



**Joana Isabel Machado
Tavares**

**Influência das Condições Ambientais nas Espumas
de Alumínio**



**Joana Isabel Machado
Tavares**

**Influência das Condições Ambientais nas Espumas
de Alumínio**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Doutora Isabel Maria Alexandrino Duarte, Investigadora do Centro de Tecnologia Mecânica e Automação da Universidade de Aveiro e do Professor Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias, docente do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha família por todo o apoio e compreensão e a todos aqueles que sempre me apoiaram.

o júri

presidente

Prof. Dr. Alfredo Balacó de Moraes
professor associado da universidade de aveiro

Prof. Dr. António Joaquim Mendes Ferreira
professor associado da faculdade de engenharia da universidade do porto

Prof. Dr. Joaquim Alexandre Mendes de Pinho da Cruz
professor auxiliar convidado da universidade de aveiro

Dr.ª Isabel Maria Alexandrino Duarte
investigadora do centro de tecnologia mecânica e automação da universidade de aveiro

Prof. Dr. Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias
professor auxiliar da universidade de aveiro

agradecimentos

O presente trabalho de investigação pretende divulgar de que forma as espumas de alumínio são influenciadas pelas condições ambientais. Um agradecimento pelas sugestões, orientação e por todo o apoio prestado na execução deste trabalho aos meus orientadores científicos Doutora Isabel Duarte e Doutor Filipe Teixeira-Dias.

Um agradecimento ao Eng. Victor Neto pela disponibilidade e apoio dado na etapa experimental de microscopia. Agradeço também à empresa M. J. Amaral na pessoa do Sr. Manuel Vide no apoio do fabrico das amostras de espuma de liga de alumínio.

palavras-chave

Espumas de Alumínio, pulverotecnologia, comportamento mecânico, condições ambientais.

resumo

As espumas de Alumínio de porosidade fechada obtidas por pulverotecnologia, têm como principais aplicações a indústria dos transportes, principalmente na indústria automóvel. Tal é devido ao facto de estes materiais apresentarem propriedades como baixa densidade, excelente capacidade de absorção de energia e amortecimento de ruído e vibrações, o que torna estes materiais excelentes para incorporar em estruturas ultra-leves, de absorção de energia e de amortecimento sonoro em diferentes partes do veículo. Assim, em condições de serviço, as espumas metálicas podem ser submetidas a diferentes condições ambientais dependendo da sua localização no veículo.

O principal objectivo do presente trabalho é estudar a influência das condições ambientais nas propriedades mecânicas de espumas de ligas AlSi7 com uma densidade relativa de 20%. Para tal, foram realizados ensaios de compressão à temperatura ambiente e a uma velocidade de carregamento constante em amostras cilíndricas submetidas a condições controladas de temperatura (-20 a 160°C), tempo (24 a 120 horas) e humidade relativa (0 e 60%).

A avaliação do comportamento mecânico destas espumas foi baseada nas curvas força-deslocamento, nos valores de tensão, nas curvas de energia absorvida e na integridade da estrutura celular. As espumas de liga AlSi7, obtidas por pulverotecnologia apresentam uma estrutura celular com uma distribuição alargada de poros de formas irregulares, assim como a presença de uma película externa densa.

Os resultados obtidos mostram que as propriedades mecânicas das espumas são afectadas pelas condições ambientais. Para valores de humidade relativa médios (60%) e temperaturas baixas, o aumento da temperatura origina um aumento da resistência mecânica e da capacidade de absorção de energia. Contrariamente, para humidades relativas de 0%, e temperaturas elevadas a resistência mecânica e a capacidade de absorção de energia diminui com o aumento da temperatura. Os resultados mostram ainda que a resistência mecânica aumenta com o aumento de tempo de exposição da espuma de liga de Alumínio a uma determinada temperatura, independentemente da percentagem de humidade relativa.

keywords

Aluminium foams, powder metallurgy, compressive behaviour, environmental conditions.

abstract

Closed-cell Aluminium foams made by powder metallurgy have potential applications in the transport industry, mainly in the automotive industry. The main properties of these materials are low density, high energy absorption capacity and noise and vibration absorption. These materials are adequate to apply in light-weight structures which need energy and sound absorption in vehicle components. In work conditions, metal foams can be submitted to different environmental conditions, depending on the specific position in the vehicle structure.

The main objective of the present work is the study of the influence of environmental conditions in the mechanical properties of AlSi7 Aluminium foams with a relative density of 20%. Thus, cylindrical samples of Aluminium foams were submitted to different temperatures in the range of -20 to 160°C, for 24 to 120 hours, as well different relative humidities (0 and 60%). The evaluation of the influence of environmental conditions in the mechanical properties of these foams was evaluated performing uniaxial compressive tests at ambient temperature with a constant velocity of 1 mm/min.

The evaluation of the behaviour of the metal foams was based on the resulting strength values, stress-strain curves and structural integrity. These foams have a superficial dense thin skin and the internal cellular structure presents a large distribution of cell size and morphology.

The results clearly show that the mechanical properties are affected by the environmental conditions. For a relative humidity of 60% and low temperatures, when temperature and time increase, mechanical resistance and energy absorption capacity also increase. In opposition, for a relative humidity of 0% and higher temperatures, the mechanical resistance and energy absorption capacity decrease with increase in temperature. In addition, for any relative humidity, when time increases, mechanical resistance and energy absorption capacity also increase.

Índice

Lista de Tabelas	v
Lista de Figuras	vii
Nomenclaturas	xiii
Capítulo 1 – Notas Introdutórias	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Actividades Desenvolvidas	2
1.3. Organização da Dissertação	3
Capítulo 2 – Estado da Arte	5
2.1. Introdução	5
2.2. Espumas de ligas de Alumínio	6
2.2.1. Estrutura	6
2.2.2. Processos de fabrico	7
2.2.2.1. Pulverotecnologia	9
2.2.2.2. Expansão directa de metal fundido	10
2.2.3. Propriedades	12
2.2.3.1. Propriedades Intrínsecas do Material	12
2.2.3.1.1. Densidade Relativa	13
2.2.3.1.2. Parâmetros Estruturais	13
2.2.3.2. Propriedades Mecânicas	15
2.2.3.2.1. Módulo de Young	16
2.2.3.2.2. Mecanismos de Deformação	16
2.2.3.2.3. Absorção de energia	19
2.2.3.3. Propriedades Térmicas	22

2.2.4.	Aplicações	23
2.2.4.1.	Industria Automóvel.....	25
2.2.4.2.	Indústria Aeroespacial.....	27
2.2.4.3.	Indústria da Construção Naval	27
2.2.4.4.	Indústria Ferroviária	27
2.3.	Alumínio e Suas Ligas	28
2.3.1.	Propriedades gerais.....	28
2.3.2.	Comportamento à corrosão.....	30
Capítulo3 – Análise Experimental		33
3.1.	Materiais.....	33
3.2.	Metodologia	34
3.2.1.	Testes Ambientais	34
3.2.2.	Ensaio Mecânicos	36
3.2.3.	Método de Determinação da Densidade.....	36
3.2.4.	MO – Microscopia Óptica	37
3.2.5.	MEV- Microscopia Electrónica de Varrimento.....	38
3.2.6.	Técnicas de Difrakção de Raios-X	40
Capítulo 4 - Resultados e Discussão		41
4.1.	Introdução.....	41
4.2.	Densidade	42
4.3.	Estrutura Celular.....	44
4.4.	Resistência à Compressão	55
4.4.1.	Resultados preliminares	58
4.4.2.	Temperatura.....	59
4.4.3.	Tempo.....	64
4.4.4.	Humidade Relativa	67

4.5.	Absorção de Energia	70
4.5.1.	Temperatura	70
4.5.2.	Tempo	73
4.5.3.	Humidade Relativa	75
4.5.4.	Casos Estudados	75
Capítulo 5 - Conclusões		79
5.1.	Estrutura Celular	79
5.2.	Influência das condições ambientais	80
5.2.1.	Metal de Base das Paredes Celulares das Espumas.....	80
5.2.2.	Densidade	81
5.2.3.	Resistência Mecânica	81
5.2.4.	Absorção de Energia	83
Capítulo 6 - Sugestões de trabalho futuro.....		85
Bibliografia		87

Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Cronograma das etapas de execução do trabalho de mestrado.....	2
Tabela 2.1: Principais parâmetros estruturais para caracterizar uma espuma metálica [4].	14
Tabela 2.2: Propriedades do Alumínio puro [26].	28
Tabela 2.3: Nomenclatura das ligas de Alumínio (“The Aluminium Association”) [28].	29
Tabela 3.1: Descrição dos testes ambientais efectuados.	34
Tabela 3.2: Velocidades utilizadas para cada temperatura.	35
Tabela 4.1: Densidade média das amostras de espumas da liga AlSi7.	42
Tabela 4.2: Características estruturais das espumas de Alumínio (13 amostras).	46
Tabela 4.3: Distribuição da dimensão média de poros (13 amostras).	46
Tabela 4.4: Espessura média da película densa externa nas várias zonas: topo, lateral e base (13 amostras).	48
Tabela 4.5: Compostos químicos identificados numa amostra de referência e nas amostras expostas a temperaturas de -20 e 160°C e humidade relativa de 60 e 0%, respectivamente.	53
Tabela 4.6: Valores das forças, deslocamentos e tensões para os pontos 1 e 2.....	58
Tabela 4.7: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para as temperaturas -20,0 e 40°C e tempo de 24 h.....	59
Tabela 4.8: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para as temperaturas -20, 0 e 40°C e tempo de 48 h.....	60
Tabela 4.9: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para as temperaturas 100 e 160°C e tempo de 24 h.	61
Tabela 4.10: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para as temperaturas de 100 e 160°C e tempo de 48 h.	61
Tabela 4.11: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para as temperaturas de 100 e 160°C e tempo de 120 h.	62

Tabela 4.12: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para os tempos de 24 e 48 h, para a temperatura de -20°C.	64
Tabela 4.13: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para os tempos de 24 e 48 h, para a temperatura de 0°C.	64
Tabela 4.14: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para os tempos de 24 e 48 h, para a temperatura de 40°C.	65
Tabela 4.15: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para os tempos de 24, 48 e 120 h, para a temperatura de 100°C.	66
Tabela 4.16: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para os tempos de 24, 48 e 120 h, para a temperatura de 160°C.	66
Tabela 4.17: Força, tensão e deslocamento inicial e final da região do patamar para as condições ambientais.	68
Tabela 4.18: Energia por unidade de volume para as diferentes condições ambientais, para deformações de 50 e 80%.	77

Lista de Figuras

Figura 2.1: Exemplos de materiais celulares: (a) estrutura em colmeia; (b) estrutura aberta; (c) estrutura fechada [3].....	6
Figura 2.2: Processos de fabrico das espumas metálicas [1].....	7
Figura 2.3: Variação do gradiente de tamanho de célula e de densidade para os diferentes processos de fabrico [1].....	9
Figura 2.4: (a) Processo de pulverotecnologia; (b) espumas de Alumínio [13]; (c) componente automóvel, com a visualização do molde usado para o seu fabrico [2] e (d) microestrutura típica de uma espuma [6].	10
Figura 2.5: Representação esquemática do método de expansão directa de metal fundido [2].	11
Figura 2.6: Método da expansão directa de metal fundido, usando um agente expensor [2].....	12
Figura 2.7: Comparação da densidade de diferentes espumas [2].....	13
Figura 2.8: Gradiente de densidade de uma espuma metálica de porosidade fechada [4].	14
Figura 2.9: Parâmetros estruturais de uma espuma de Alumínio.....	15
Figura 2.10: Variação do módulo de Young com a densidade para diferentes espumas [2].....	16
Figura 2.11: Mecanismos de deformação para espumas de células fechadas [3].....	17
Figura 2.12: Curvas de tensão - deformação de ensaio de compressão, em que σ_{pl} é a tensão de patamar, σ é a tensão e ε é a deformação [3].	17
Figura 2.13: Curvas tensão-deformação de ensaios de compressão de espumas de Alumínio, para diferentes densidades [4].....	19
Figura 2.14: (a) Energia absorvida entre uma espuma metálica e o material de base [3]. (b) Curvas de compressão de dois absorsores com a mesma capacidade de absorção de energia, mas com diferente tensão máxima [4]. Legenda: σEs – tensão de compressão sobre o módulo de <i>Young</i> do material de base, WEs – energia absorvida sobre o módulo de <i>Young</i> do material de base, ε – deformação; EV – energia absorvida por unidade de volume.	19
Figura 2.15: (a) Comparação entre um absorsor real e o ideal [2]. (b) Curvas tensão-deformação e de eficiência de absorção de energia de espuma de liga AlSi12 ($\rho=0,36 \text{ g/cm}^3$) [16].	20

Figura 2.16: (a) Absorção de energia para espumas metálicas com diferentes densidades [17]. (b) Variação da tensão com a densidade de espumas de Alumínio com diferentes capacidades de absorção de energia por unidade de volume [16].	21
Figura 2.17: Capacidade de absorção de energia para vários tipos de espumas [2, 3].	22
Figura 2.18: Aplicações das espumas metálicas [2].	24
Figura 2.19: Potenciais aplicações estruturais de espumas metálicas no sector dos transportes.	25
Figura 2.20: Componentes em espuma metálica [4, 17].	25
Figura 2.21: Integração de espuma metálica num automóvel: (a) estrutura de protecção lateral [22] e (b) estrutura de absorção de impacto [13].	26
Figura 2.22: Painel tipo <i>sandwich</i> formado por duas chapas de aço com núcleo em espuma de Alumínio [6].	27
Figura 2.23: Mecanismos de corrosão da superfície: (1) micro fractura (2) presença de poeiras e (3) formação de um produto poroso [26].	31
Figura 3.1: Algumas amostras de espuma de liga AlSi7.	33
Figura 3.2: Material precursor.	33
Figura 3.3: Esquema da metodologia utilizada na análise experimental.	34
Figura 3.4: (a) Câmara ambiental TIRAclima TCC 4034 e (b) painel de controlo da câmara para programação da temperatura e humidade relativa.	35
Figura 3.5: (a) Máquina de ensaios universal. (b) Visualização de uma amostra de alumínio durante o ensaio de compressão.	36
Figura 3.6: Esquema de corte das amostras de espuma de Alumínio.	37
Figura 3.7: Microscópio óptico Nikon Eclipse LV150.	38
Figura 3.8: Microscópio electrónico de varrimento (HR-FESEM Hitachi SU-70).	39
Figura 3.9: Amostra de espuma de Alumínio preparada para o MEV.	39
Figura 3.10: a) Difractómetro de raio-X; b) Local no difractómetro onde se testa uma amostra.	40
Figura 3.11: Amostra de espuma de Alumínio para a análise à difracção de raios-X.	40
Figura 4.1: Densidade média das amostras antes e após o teste ambiental (escala de densidade truncada).	42

Figura 4.2: Visualização do material precursor, em que as partículas de Silício e de TiH_2 encontram-se distribuídas no interior da matriz de Alumínio.....	44
Figura 4.3: Imagem da secção de uma amostra de espuma de alumínio.....	45
Figura 4.4: Medições do diâmetro de poros celulares e de espessura de paredes celulares.....	46
Figura 4.5: Distribuição dimensional de poros (13 amostras).....	47
Figura 4.6: Película externa densa no topo, base e lateral numa amostra de espuma.....	48
Figura 4.7: Visualização da espessura da película densa externa no topo de amostras.....	48
Figura 4.8: Visualização da espessura da película densa externa nas faces laterais de amostras.....	48
Figura 4.9: Visualização da espessura da película densa externa na base de amostras.....	49
Figura 4.10: Secção de uma amostra de espuma de Alumínio em que se evidencia a morfologia dos poros celulares e presença de defeitos.....	49
Figura 4.11: Visualização de poros de geometria esférica.....	50
Figura 4.12: Visualização de poros de geometria poliédrica.....	50
Figura 4.13: Visualização da presença de poros celulares de pequena dimensão (a) em paredes finas, (b) em paredes espessas e (c) uma parede celular sem poros.....	50
Figura 4.14: Visualização de junções de Plateau.....	50
Figura 4.15: Visualização de poros no topo da amostra.....	51
Figura 4.16: Visualização de poros na lateral da amostra.....	51
Figura 4.17: Visualização de poros na base da amostra.....	51
Figura 4.18: Presença de fendas nas paredes celulares: (a) e (b) imagens obtidas no microscópio óptico e (c) imagem obtida no MEV.....	52
Figura 4.19: (a) Microestrutura das paredes celulares; (b) mapa de raios-X do Alumínio e (c) mapa de raios-X do Silício.....	53
Figura 4.20: Curva força–deslocamento, com a indicação das principais regiões, delimitadas pela força inicial F_1 e força final F_2 do patamar, com os respectivos deslocamentos, d_1 e d_2	56
Figura 4.21: Diagrama de ensaio à compressão de uma amostra de espuma de Alumínio.....	57
Figura 4.22: Formas das curvas força–deslocamento, onde se observam formas da região inicial do patamar.....	58

Figura 4.23: Curvas de força–deslocamento obtidas para amostras de espuma de Alumínio que não foram submetidas às condições ambientais.....	58
Figura 4.24: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes temperaturas (t=24 h e HR=60%)......	60
Figura 4.25: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes temperaturas (t=48 h e HR=60%)......	60
Figura 4.26: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes temperaturas (t=24 h e HR=0%)......	61
Figura 4.27: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes temperaturas (t=48 h e HR=0%)......	62
Figura 4.28: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes temperaturas (t=120 h e HR=0%)......	62
Figura 4.29: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes tempos (T=20°C e HR=60%)......	64
Figura 4.30: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes tempos (T=0°C e HR=60%)......	65
Figura 4.31: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes tempos (T=40°C e HR=60%)......	65
Figura 4.32: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes tempos (T=100°C e HR=0%)......	66
Figura 4.33: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes tempos (T=160°C e HR=0%)......	67
Figura 4.34: Tensão inicial e final do patamar das condições ambientais com humidade relativa de 60%.	68
Figura 4.35: Tensão inicial e final do patamar das condições ambientais com humidade relativa de 0%.	69
Figura 4.36: Resultados experimentais para espumas de liga AlSi7 submetidas a T=20°C e HR=50%: (a) Curva força–deslocamento e (b) curva energia–deslocamento.	70
Figura 4.37: Curvas energia–deslocamento para temperaturas de -20, 0 e 40°C, com humidade relativa 60% e tempo de 24 h.	71

Figura 4.38: Curvas energia–deslocamento para temperaturas de -20, 0 e 40°C, com humidade relativa 60% e tempo de 48 h.	71
Figura 4.39: Curvas energia–deslocamento para temperaturas de 100 e 160°C, com humidade relativa 0% e tempo de 24 h.	72
Figura 4.40: Curvas energia–deslocamento para temperaturas de 100 e 160°C, com humidade relativa 0% e tempo de 48 h.	72
Figura 4.41: Curvas energia–deslocamento para temperaturas de 100 e 160°C, com humidade relativa 0% e tempo de 120 h.	72
Figura 4.42: Curvas energia–deslocamento para diferentes tempos de exposição (24 e 48 h), com temperatura de -20°C e humidade relativa de 60%.	73
Figura 4.43: Curvas energia–deslocamento para diferentes tempos de exposição (24 e 48 h), com temperatura de 0°C e humidade relativa de 60%.	73
Figura 4.44: Curvas energia–deslocamento para diferentes tempos de exposição (24 e 48 h), com temperatura de 40°C e humidade relativa de 60%.	74
Figura 4.45: Curvas energia–deslocamento para diferentes tempos de exposição (24, 48 e 120 h), com temperatura de 100°C e humidade relativa de 0%.	74
Figura 4.46: Curvas energia–deslocamento para diferentes tempos de exposição (24, 48 e 120 h), com temperatura de 160°C e humidade relativa de 0%.	74
Figura 4.47: Representação esquemática: (a) da curva força–deslocamento e (b) da curva tensão–deformação para um absorvedor de energia. A área abaixo da curva corresponde à energia absorvida. Legenda: E - energia absorvida, E_v - energia por unidade de volume, F- força, δ - deslocamento, σ – tensão, ε - deformação [20].	76
Figura 4.48: Energia absorvida por unidade de volume para as condições ambientais com humidade relativa de 60%.	78
Figura 4.49: Energia absorvida por unidade de volume para as condições ambientais com humidade relativa de 0%.	78

Nomenclaturas

Símbolo	Descrição	Unidades
ρ_r	Densidade relativa da espuma	-
ρ_s	Densidade sólido base	kg.m ⁻³
ρ^*	Densidade da espuma	kg.m ⁻³
ϕ	Fracção de sólido das arestas das células da espuma	-
E_s	Módulo de Young do material de base	N.m ⁻²
E^*	Módulo de Young da espuma	N.m ⁻²
σ_{pl}	Tensão de patamar	N.m ⁻²
σ_y^*	Tensão de cedência da espuma	N.m ⁻²
σ_{ys}	Tensão de cedência do material base	N.m ⁻²
η	Eficiência de absorção de energia	-
E_V	Energia absorvida por unidade de volume	J.m ⁻³
σ	Tensão de compressão	N.m ⁻²
ε	Deformação do material devido à compressão	-
c_p	Calor específico	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
q	Taxa de transmissão de calor	W
T	Temperatura	K
A	Área da secção da amostra	m ²
K	Condutividade térmica da espuma	W.m ⁻¹ K ⁻¹
K_s	Condutividade térmica do metal de base	W.m ⁻¹ K ⁻¹
R_s	Resistividade do material base	Ω .m
R	Resistividade da espuma	Ω .m
η_{amort}	Factor de perda	-
d_A	Decaimento da amplitude	%
f_n	Frequência de ressonância	Hz
HR	Humidade relativa	%
P_{vapor}	Pressão do vapor de água	N.m ⁻²
P_{sat}	Máxima pressão de vapor (saturação)	N.m ⁻²
t	Tempo	s
D	Diâmetro da amostra	m

F_1	Força inicial da região do patamar	N
F_2	Força final da região do patamar	N
d_1	Deslocamento no início da região do patamar	m
d_2	Deslocamento no final da região do patamar	m
F	Força de Compressão	N
σ_1	Tensão inicial da região do patamar	N.m ⁻²
σ_2	Tensão final da região do patamar	N.m ⁻²
Δd	Deslocamento correspondente à região de patamar	m
E	Energia absorvida	J
δ	Deslocamento	m

Fórmula Química

Al	Alumínio
Si	Silício
Ti	Titânio
C	Carbono
$CaCO_3$	Carboneto de Cálcio
TiH_2	Hidreto de Titânio
CO_2	Dióxido de Carbono
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
O_2	Oxigénio
$Al(OH)_3$	Hidróxido de Alumínio
Mn	Manganés
Cu	Cobre
Mg	Magnésio
Fe	Ferro
Li	Lítio
Ni	Níquel

Capítulo 1 – Notas Introdutórias

1.1. Enquadramento

As espumas metálicas de porosidade fechada, em particular as espumas de Alumínio, têm tido cada vez mais notoriedade na indústria de transportes, em especial na indústria automóvel. Estes materiais são utilizados para produção de peças e componentes devido às suas propriedades, entre as quais se destaca a resistência mecânica e peso e a elevada capacidade de absorção/dissipação de energia, contribuindo para o baixo consumo e aumento da segurança do veículo, e ainda têm uma boa capacidade de absorção de ruído e vibrações, proporcionando assim maior conforto aos passageiros.

A espuma metálica pode participar na estrutura de um veículo em componentes localizados quer junto ao compartimento do motor, em que terá que suportar elevadas temperaturas, quer em reforços da carroçaria, em barras protectoras frontais ou laterais, ficando assim exposto à intempérie do meio ambiente.

Neste contexto, o principal objectivo desta tese foi estudar a influência das condições ambientais nas propriedades mecânicas de espumas de ligas de Alumínio de estrutura fechada, obtidas por pulverotecnologia.

1.2. Actividades Desenvolvidas

Para se atingir os objectivos da dissertação de Mestrado intitulada por “Influência das condições ambientais nas espumas de Alumínio” seguiu-se o plano de trabalho proposto inicialmente (Tabela 1.1).

Tabela 1.1: Cronograma das etapas de execução do trabalho de mestrado.

Tarefas	Descrição	Semanas															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Estado da Arte																
2	Caracterização do Material																
3	Ensaio de Envelhecimento e de Compressão																
4	Escrita da Dissertação																
Relatórios de Progresso																	

Na primeira tarefa realizou-se um levantamento bibliográfico onde se descreveram as principais aplicações, propriedades e processos de fabrico das espumas de Alumínio, assim como uma abordagem às principais propriedades de ligas de Alumínio, incluindo a corrosão atmosférica.

Na segunda tarefa iniciou-se o trabalho experimental com a caracterização do material em estudo, através da determinação da densidade e da visualização da estrutura celular interna das amostras de espuma de Alumínio.

Na terceira tarefa realizaram-se testes ambientais em amostras de espuma de Alumínio para diferentes condições de temperatura, humidade relativa e tempos. Para tal, as amostras foram colocadas numa câmara climática com controlo de temperatura e de humidade relativa. A determinação do comportamento mecânico das espumas submetidas às diferentes condições ambientais foi efectuada através de ensaios de compressão. Também foram realizados ensaios de compressão em amostras do mesmo material que não estiveram expostas na câmara climática.

Por último, a quarta tarefa consistiu na elaboração da escrita da dissertação, onde se descreveram, nomeadamente, a metodologia experimental usada e a apresentação dos resultados obtidos com a respectiva discussão de resultados e conclusões.

1.3. Organização da Dissertação

A dissertação está organizada em seis (6) capítulos. O Capítulo 1 apresenta o enquadramento da tese e a sua organização.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica incluindo o estado da arte das espumas de Alumínio, onde se descrevem as principais aplicações, propriedades e processos de fabrico. Apresenta-se ainda uma abordagem aos aspectos considerados mais importantes para a interpretação dos resultados, nomeadamente o comportamento das ligas de Alumínio em certas condições ambientais.

O Capítulo 3 descreve os procedimentos experimentais, nomeadamente, os materiais em estudo, o procedimento dos testes ambientais, dos testes de comportamento mecânicos efectuados e análise estrutural.

No Capítulo 4 apresentam-se os principais resultados obtidos na execução deste trabalho experimental incluindo a discussão de resultados referente aos ensaios de compressão e análise estrutural da espuma de Alumínio submetida a diferentes condições climáticas.

Os Capítulos 5 e 6 apresentam as principais conclusões do trabalho desenvolvido e as principais sugestões para trabalhos futuros nesta área de investigação, respectivamente.

Capítulo 2 – Estado da Arte

2.1. Introdução

As espumas metálicas de estrutura porosa fechada, têm vindo a ter cada vez maior destaque no sector de transportes, principalmente no sector automóvel, devido a apresentarem propriedades como baixa densidade, contribuindo assim para a diminuição de consumo do veículo, excelente capacidade de absorção/dissipação de energia ao impacto proporcionando um aumento de segurança activa do veículo, e ainda excelente capacidade de amortecimento de ruído e vibrações. Devido a estas características, estas espumas metálicas estão a ser testadas para integrar estruturas metálicas e assim contribuir para o aumento da resistência mecânica destas estruturas, sem que exista um aumento significativo de peso.

As espumas de ligas de Alumínio, obtidas por pulverotecnologia, combinam as propriedades das espumas de estrutura porosa fechada com as do material de base (liga de Alumínio). Deste modo, para o conhecimento adequado deste material, é fundamental estudar as principais características quer das espumas de porosidade fechada quer das ligas de Alumínio.

2.2. Espumas de ligas de Alumínio

2.2.1. Estrutura

No universo dos materiais celulares, estão incluídas as espumas que são materiais líquidos ou sólidos que contêm alvéolos no seu interior, sendo designadas por espumas líquidas e espumas sólidas, respectivamente. As espumas líquidas são constituídas por bolhas de gás dispersas numa quantidade pequena de líquido, como por exemplo a espuma de uma cerveja. Nas espumas sólidas a fase líquida é substituída por uma sólida. Geralmente, a espuma sólida emerge de uma espuma líquida em que as bolhas de gás são dispersas finamente num líquido [1].

As espumas sólidas são materiais com uma estrutura altamente porosa em que o material de base pode ser um metal, um polímero ou um cerâmico, dando origem a espumas metálicas, poliméricas e cerâmicas, respectivamente. Estes materiais são identificados por serem constituídos por uma rede de material sólido, com paredes planas ou filiformes (segmentos), que formam as intersecções, faces ou arestas de um elemento estrutural confinado, a célula, a sua distribuição espacial [2].

Existem três tipos de estruturas, nomeadamente, a estrutura em colmeia, a estrutura porosa de células abertas e a estrutura porosa de células fechadas (Figura 2.1).

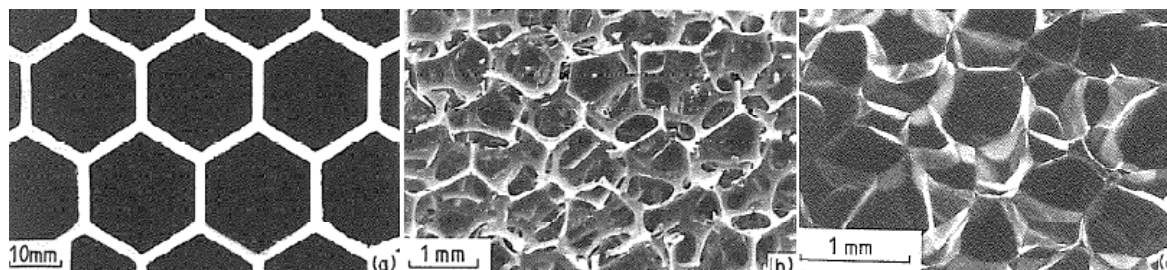


Figura 2.1: Exemplos de materiais celulares: (a) estrutura em colmeia; (b) estrutura aberta; (c) estrutura fechada [3].

A principal característica das espumas sólidas, que as diferencia dos outros materiais, é o facto de apresentarem valores de densidade muito inferiores aos restantes materiais, constituindo mesmo uma vantagem para certas aplicações nos diferentes sectores industriais. As espumas de estrutura aberta, que se mostram na Figura 2.1b, são normalmente utilizadas em aplicações funcionais, como filtros e permutadores de calor. As espumas de estrutura fechada, representadas na Figura 2.1c, são usadas maioritariamente em aplicações estruturais, por apresentarem uma elevada capacidade de absorção de energia e de amortecimento de ruído e vibrações.

As propriedades destes materiais derivam da combinação da estrutura porosa com a natureza metálica do material de base. Assim, os parâmetros que mais influenciam as propriedades finais das

espumas metálicas são: as propriedades do material de base; o tipo de estrutura celular - abertas ou fechadas; a anisotropia; as características das células - geometria, dimensão e distribuição; distribuição da fracção de sólidos; a densidade relativa; os gradientes de densidade e a presença de defeitos [4, 5].

2.2.2. Processos de fabrico

As espumas metálicas podem ser obtidas por diferentes processos de fabrico [2-4, 6, 7]. Estes podem ser divididos em três grupos distintos de acordo com o estado inicial do metal – pó, fundido ou ionizado (Figura 2.2).

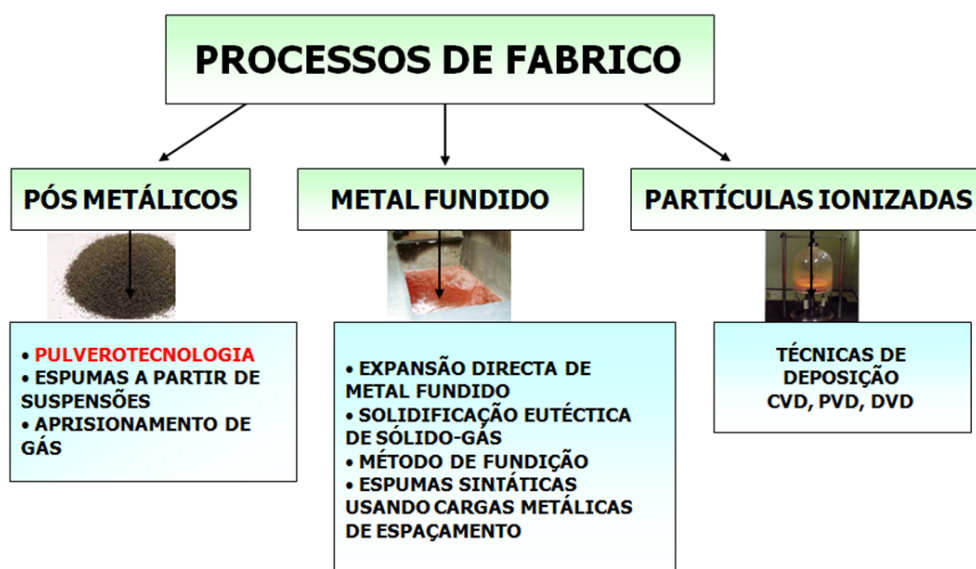


Figura 2.2: Processos de fabrico das espumas metálicas [1].

Resumidamente, os principais processos de fabrico de espumas metálicas a partir de metal fundido são [2, 4, 6]:

- Método de expansão directa do metal fundido:
O método consiste na injeção de gás no seio do metal fundido, ou na adição de um agente expensor que sofre decomposição térmica libertando gás. Este método é geralmente usado para produção de painéis de elevados volumes de espuma metálica de estrutura fechada.
- Método de solidificação eutética de sólido – gás:
O método consiste na fusão do metal numa atmosfera de hidrogénio, sendo arrefecida através do ponto eutético, em que o hidrogénio é a fase gasosa no interior do metal. Este processo é geralmente utilizado para fabrico de metais e cerâmicos porosos.

- Método de fundição de precisão:

O processo de fundição de precisão consiste no vazamento de metal fundido para uma caixa de moldação com uma peça contra-molde de espuma cerâmica de estrutura aberta anteriormente preparada com a forma desejada da espuma final. De seguida o material constituinte do molde é removido e obtém-se a espuma metálica. Este método é utilizado na produção de espumas com células abertas, que permitem ser aplicadas como reservatórios de armazenamento de gases e líquidos e podem ser obtidas espumas metálicas de elevada qualidade.

- Método de fabrico de espumas sintáticas usando enchimentos metálicos:

O método de obtenção de espumas sintáticas usando enchimentos metálicos consiste numa simples infiltração de metal fundido para o interior de grânulos inorgânicos ou esferas ocas de baixa densidade.

Os métodos de fabrico mais usuais para a produção de espumas metálicas por partir de metal em pó são [2, 4, 6]:

- Método de aprisionamento de gás:

O método de aprisionamento de gás consiste na compactação de pós metálicos numa atmosfera de gás dando origem a um material precursor. O aquecimento do material precursor origina a expansão do metal devido à pressão interna criada pelo gás aprisionado.

- Método de expansão de suspensões de pós:

O processo de expansão de suspensões de pós consiste na sintetização de pós de metal, sem sofrer compactação, obtendo-se materiais porosos com porosidade aberta ou inter-ligada. No entanto, estas espumas apresentam uma baixa resistência mecânica.

- Método de pulverotecnologia:

O processo de pulverotecnologia consiste na compactação a quente de pós metálicos misturados com pós de agente expensor para se obter o material precursor. Finalmente, a espuma é formada por simples aquecimento do material precursor a temperaturas acima da temperatura de fusão do metal de base, originando a sua expansão.

As espumas metálicas podem também ser obtidas através de técnicas de deposição, a partir de partículas metálicas ionizadas, nomeadamente deposição química de vapor (CVD), deposição física de vapor (PVD) e deposição directa de vapor (DVD) [2, 4, 6]. No entanto, estes processos são muito dispendiosos, sendo geralmente usados em aplicações especiais na indústria aeroespacial [2].

A variedade de processos de fabrico de espumas metálicas permite a obtenção de espumas de diferentes estruturas (aberta e fechada) e de diferentes densidades (Figura 2.3), razão pela qual são usadas nos diferentes sectores industriais [2].

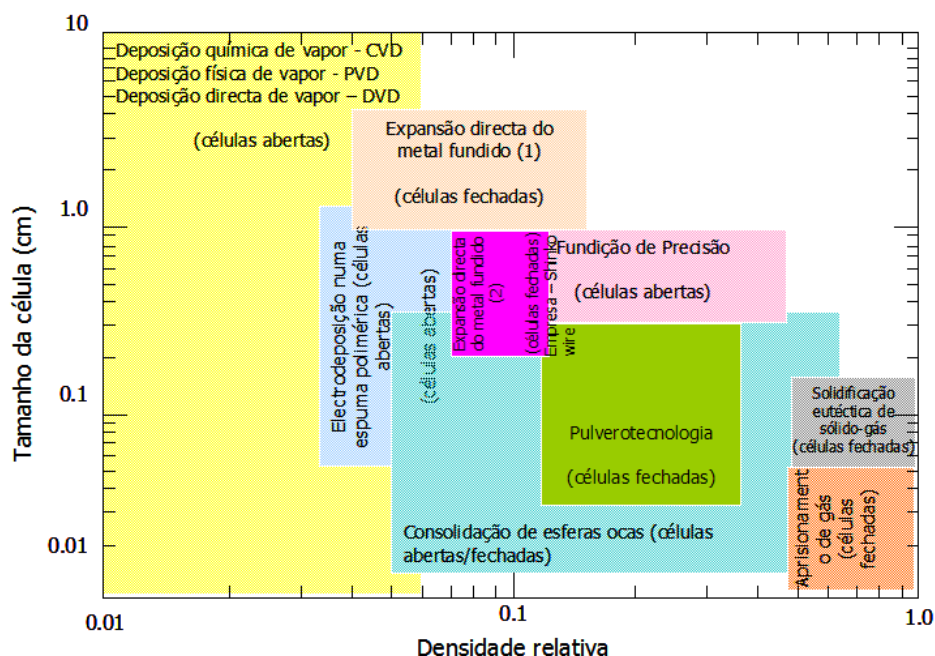


Figura 2.3: Variação do gradiente de tamanho de célula e de densidade para os diferentes processos de fabrico [1].

Dos vários processos de fabrico existentes e viáveis industrialmente para a produção de espumas metálicas de estrutura fechada, em particular as espumas de ligas de Alumínio, destacam-se o método de expansão directa de metal fundido e o método de pulverotecnologia [2]. O método de expansão directa é geralmente usado quando se pretende elevados volumes de produção de painéis de espuma metálica. Contrariamente, o método de pulverotecnologia permite produzir componentes de diferentes configurações, de diferentes geometrias, incluindo a geometria complexa e ainda promove a ligação de espumas metálicas a outros materiais durante o próprio processo de formação da espuma, evitando a aplicação de técnicas de ligação convencionais [8, 9]. De seguida, serão descritos estes dois processos de fabrico, sendo que as espumas de Alumínio estudadas neste trabalho de investigação foram obtidas através de pulverotecnologia.

2.2.2.1. Pulverotecnologia

O processo de pulverotecnologia consiste na compactação a quente de uma mistura de pós de metal e de agente expensor, de forma a obter produtos semi-acabados “isentos” de porosidade, designados por materiais precursores (Figura 2.4) [9-11]. A compactação pode ser obtida com

prensagem unidireccional, prensagem isostática ou extrusão. Posteriormente, ocorre a etapa de expansão (desenvolvimento da estrutura porosa) a temperaturas acima da temperatura de fusão do material base. Após se atingir a expansão requerida, procede-se a um arrefecimento relativamente rápido, dando origem a um sólido poroso de estrutura fechada com uma película exterior densa [2]. As espumas metálicas resultantes deste processo têm valores típicos de densidade entre 0,2 g/cm³ e 1,0 g/cm³. Este processo está a ser comercializado pelas empresas Shunk (na Alemanha), Mepura (na Áustria), com os nomes comerciais Foaminal e Alulight respectivamente [2, 12]. Actualmente estas espumas de Alumínio têm sido testadas na produção de componentes automóveis e em aplicações aeroespaciais [2].

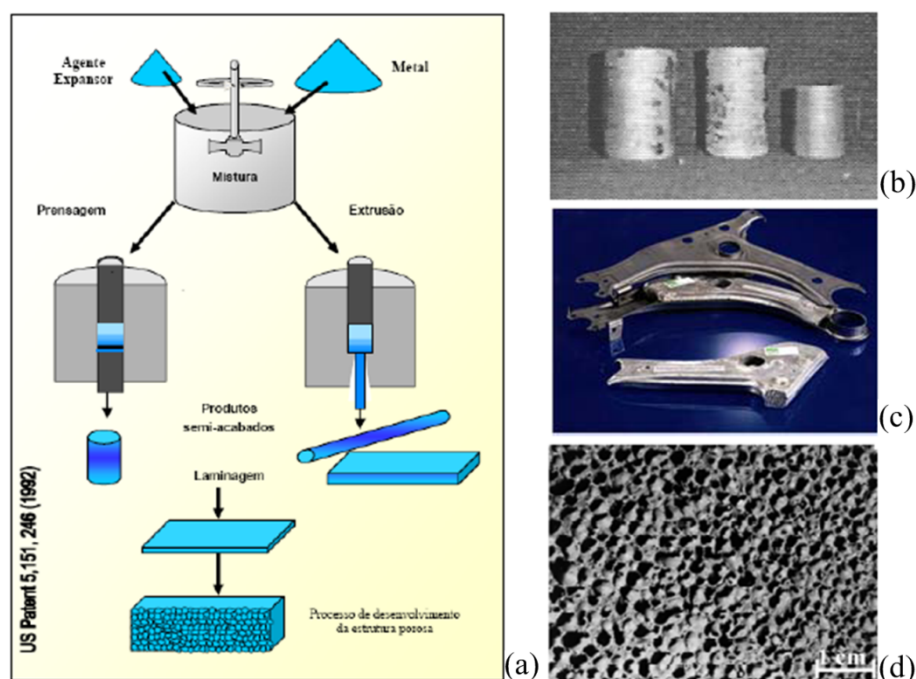


Figura 2.4: (a) Processo de pulverotecnologia; (b) espumas de Alumínio [13]; (c) componente automóvel, com a visualização do molde usado para o seu fabrico [2] e (d) microestrutura típica de uma espuma [6].

2.2.2.2. Expansão directa de metal fundido

O processo de expansão directa do metal fundido consiste na injeção de gás (dióxido de carbono, oxigénio, ar ou gases inertes) para o interior de metal fundido, ou por adição de um agente expansor que sofre decomposição térmica libertando gás [2]. Para que as bolhas de gás injectadas ou formadas por decomposição térmica de um agente expansor não alcancem a superfície rapidamente num líquido altamente denso ou rebentem antes de alcançar a superfície do metal fundido são geralmente adicionados pós cerâmicos finos (por exemplo carboneto de Silício ou

alumina) ou elementos de liga na forma de pó ao metal fundido. Deste modo, ao se controlar a viscosidade do metal fundido, controla-se a velocidade de ascensão das bolhas de gás até à superfície do metal fundido.

Actualmente o processo de expansão directa de metal fundido é utilizado por duas empresas comerciais – Cymat (no Canadá) e Shinko-Wire (no Japão) [2].

No fabrico de espumas de Alumínio através do método Cymat (Figura 2.5), inicialmente o metal é fundido, sendo de seguida transferido para um reservatório onde se irá dar a injeção de gás na forma de bolhas. As bolhas de gás ascendem à superfície superior do reservatório formando uma massa espumosa semilíquida constituída por uma mistura de metal fundido e de bolhas de gás. De seguida procede-se ao vazamento contínuo da massa semilíquida para um tapete rolante de extracção, com subsequente solidificação do metal. A obtenção de painéis de espuma é conseguida através de um outro tapete rolante colocado na parte superior do tapete rolante de extracção.

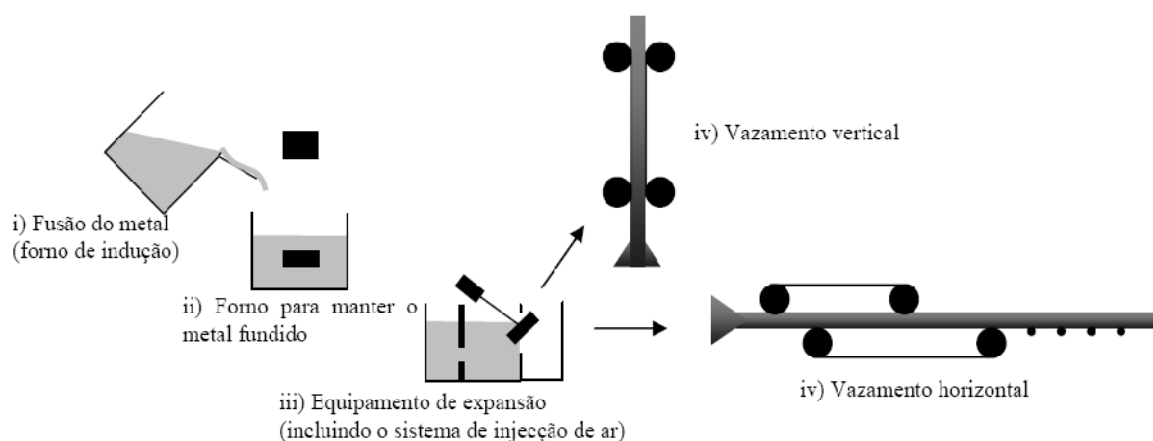


Figura 2.5: Representação esquemática do método de expansão directa de metal fundido [2].

A elevada produção de perfis a 2D associado ao relativo baixo preço e a baixa densidade alcançada são vantagens aliadas ao processo. Este método é particularmente utilizado para produção de painéis de elevados volumes de espuma metálica de estrutura fechada. Os painéis resultantes deste método podem ter valores de densidade entre 2 e 20% da densidade do Alumínio. Uma desvantagem deste método é a elevada percentagem de partículas cerâmicas presentes que poderá dificultar a maquinagem dos painéis [14].

O outro método de fabrico de espumas metálicas a partir do metal fundido é através da adição de um agente expensor no interior do metal (Figura 2.6). O agente expensor decompõe-se termicamente devido ao calor do próprio metal fundido dando origem à libertação de um gás,

responsável pelo processo de expansão. A Shinko-Wire (no Japão) é a empresa que explora este processo, cujo nome comercial é Alporas.

Neste método são utilizados o carboneto de Cálcio (CaCO_3) para estabilização do fundente e o dihidreto de Titânio (TiH_2) que actua como agente expensor decompondo-se termicamente e libertando Hidrogénio. As espumas de Alumínio obtidas têm uma estrutura de células fechadas e a densidade pode variar entre 0,25 e 0,33 g/cm³. Os blocos de espuma metálica finais podem ser aplicados como painéis de isolamento de som em túneis rodoviários e em auditórios [2].

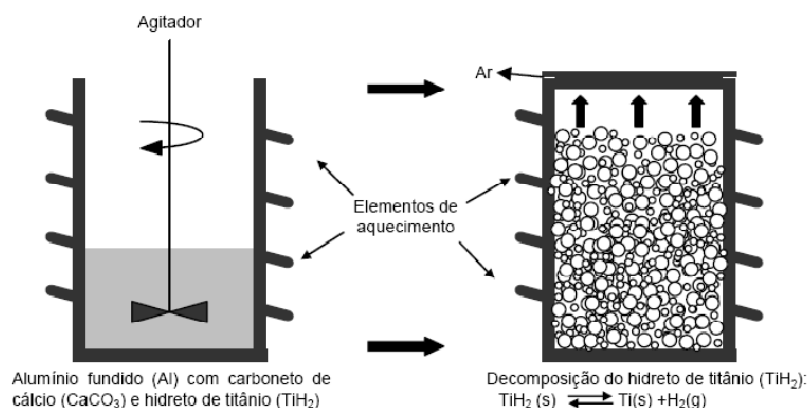


Figura 2.6: Método da expansão directa de metal fundido, usando um agente expensor [2].

2.2.3. Propriedades

O estudo do comportamento e das propriedades das espumas metálicas requer uma análise complexa, devido às propriedades dependerem da estrutura porosa (geometria, forma e espessura), das propriedades intrínsecas do material constituinte e, no caso das espumas de estrutura fechada, do tipo de atmosfera aprisionada nas células [2].

As propriedades físicas, mecânicas e térmicas destas espumas são normalmente determinadas pelos mesmos métodos que são usados em metais sólidos compactos [4, 6, 15]. Relativamente ao metal de base existem algumas propriedades que não se alteram como, por exemplo, a estrutura cristalina, o coeficiente de expansão térmica e a temperatura de fusão [4].

2.2.3.1. Propriedades Intrínsecas do Material

As propriedades das espumas metálicas dependem principalmente da sua densidade e das suas características estruturais. Desta forma, é necessário caracterizar e compreender estes parâmetros como o objectivo de os correlacionar com as propriedades mecânicas, acústicas, térmicas, *etc.*

2.2.3.1.1. Densidade Relativa

Os materiais celulares caracterizam-se pela baixa fracção de sólido (em volume) sendo a densidade relativa a propriedade mais importante das espumas metálicas, definida como o quociente entre a densidade da espuma (ρ^*) e a densidade do material de base (ρ_s). A densidade relativa (ρ_r) é [2]:

$$\text{densidade relativa} = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (1)$$

A fracção volúmica de poros, denominada por porosidade, é dada pela equação:

$$\text{porosidade} = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (2)$$

A densidade relativa, em conjunto com outras propriedades, diferencia as espumas metálicas dos outros materiais (Figura 2.7). As espumas metálicas, normalmente, apresentam densidade relativa entre 0,03 e 0,3 [5].

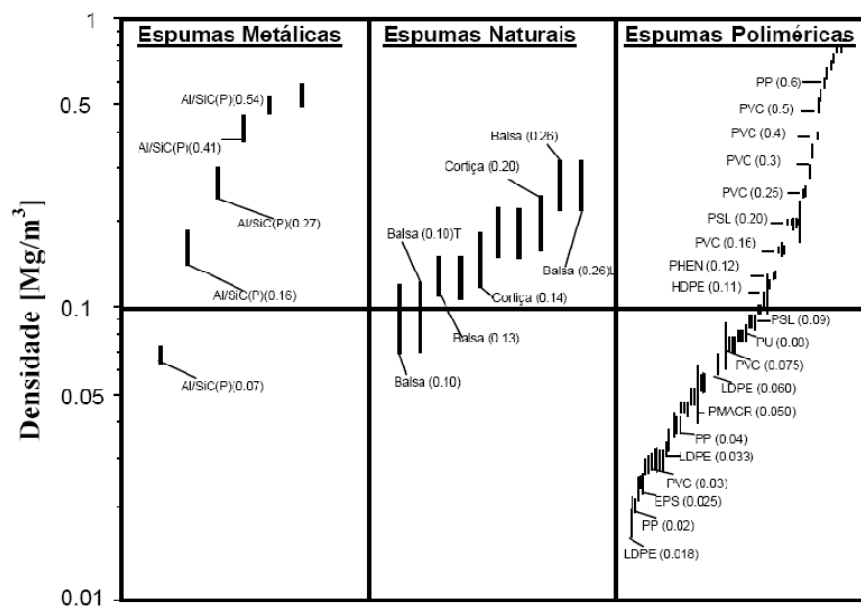


Figura 2.7: Comparação da densidade de diferentes espumas [2].

2.2.3.1.2. Parâmetros Estruturais

A análise estrutural de uma espuma pode ser realizada analisando o material quer do ponto de vista global, quer a nível dos seus principais constituintes que são as células e a rede estrutural do material de base, incluindo aspectos relacionados com a sua microestrutura (Tabela 2.1).

Tabela 2.1: Principais parâmetros estruturais para caracterizar uma espuma metálica [4].

ESTRUTURA CELULAR = CÉLULAS + METAL DE BASE (rede estrutural)		
❖ Tipo de célula: Aberta Fechada	❖ Fracção em volume ❖ Factor de forma ❖ Orientação ❖ Dimensão	❖ Paredes celulares: Espessura Comprimento Curvatura ❖ Junções: Número Área
❖ Células: Isotropia Anisotropia	Microestrutura ❖ Grãos ❖ Partículas ❖ Estruturas dendríticas ❖ Homogeneidade química	
❖ Gradiente de densidade		❖ Microporos
❖ Composição química do material celular		❖ Inclusões ❖ Eutéticos ❖ Defeitos

A espuma metálica é caracterizada consoante o tipo de porosidade que apresenta (aberta ou fechada) e através da composição química do metal de base.

O gradiente de densidade permite perceber como os poros estão distribuídos numa estrutura anisotrópica (Figura 2.8).

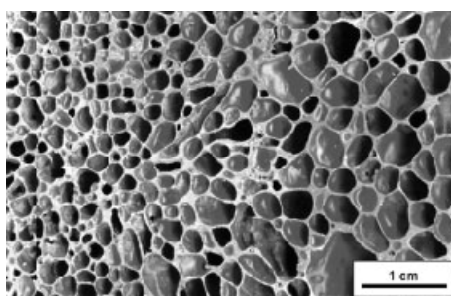


Figura 2.8: Gradiente de densidade de uma espuma metálica de porosidade fechada [4].

A análise estrutural do ponto de vista das células deve ser direccionada para determinar parâmetros como a fracção volúmica de células abertas e/ou fechadas, a distribuição de tamanhos de células e a sua geometria. No entanto, esta caracterização não é, por si só, suficiente para a caracterização da espuma, mesmo no caso de a estrutura celular ser uniforme.

As espumas metálicas são geralmente anisotrópicas, em que os poros não são uniformes e têm diferentes orientações (Figura 2.8) [4].

A rede estrutural ou esqueleto equivale à interligação das paredes celulares através de intersecções, também designadas por junções de Plateau, ou seja, corresponde ao conjunto das paredes celulares e junções de Plateau. Na Figura 2.9 observa-se a rede estrutural de uma espuma de Alumínio de porosidade fechada, onde são identificados alguns parâmetros estruturais, como os poros, as paredes celulares e as junções de Plateau. A fracção de volume de uma espuma resulta da totalidade do material da rede estrutural da espuma.

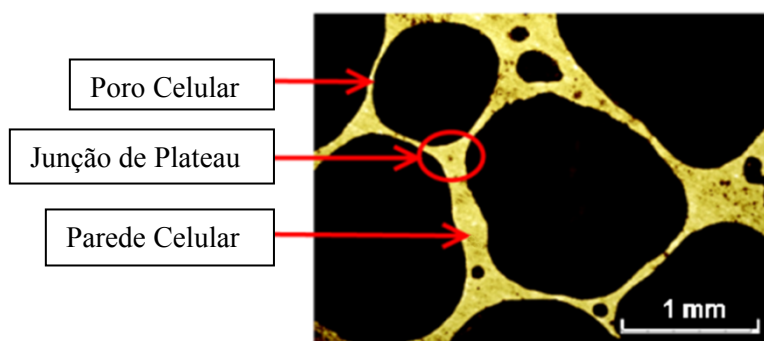


Figura 2.9: Parâmetros estruturais de uma espuma de Alumínio.

Na caracterização da rede estrutural devem ser identificados o número de nós e de paredes por célula, o comprimento, a forma, a espessura e a curvatura das paredes celulares [4].

Os diferentes processos de fabrico usados para a obtenção de espumas metálicas conduzem a materiais anisotrópicos com imperfeições geométricas. Estas espumas apresentam uma distribuição alargada de tamanho de poros com diferentes paredes celulares descontínuas e distorcidas com diferentes espessuras.

As propriedades do material de base condicionam as propriedades da espuma, pelo que é necessário estudar minuciosamente as paredes celulares, nomeadamente a sua microestrutura e detectar a presença de defeitos estruturais ou partículas estranhas.

2.2.3.2. Propriedades Mecânicas

A compreensão dos mecanismos de deformação e das propriedades mecânicas das espumas metálicas é de extrema importância para uma adequada aplicação destes materiais como estruturas ultra-leves, de absorção de energia e de amortecimento sonoro. As espumas metálicas têm uma elevada capacidade de absorção e dissipação de energia que pode ser calculada experimentalmente através das suas curvas tensão-deformação obtidas dos ensaios à compressão.

2.2.3.2.1. Módulo de Young

Na literatura existem diversos modelos matemáticos que relacionam o módulo de Young relativo (E^*/E_s) com a densidade relativa da espuma [2]. As expressões seguintes foram propostas por Ashby e Gibson para determinar o módulo de Young relativo de espumas de estrutura fechada, de baixas densidades ($\rho_r < 0,2$), onde ϕ é a contribuição das arestas das células, $1 - \phi$ é a contribuição das faces das células e o índice 's' diz respeito às propriedades do material base [2, 4].

$$\frac{E^*}{E_c} \approx \phi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_c} \right)^2 + (1 - \phi) \frac{\rho^*}{\rho_c} \quad (3)$$

A dependência do módulo de elasticidade com a densidade relativa nas espumas é claramente observada na Figura 2.10. As espumas metálicas apresentam valores de módulo de Young superiores aos valores das espumas cerâmicas ou poliméricas, o que faz destes materiais preferenciais para certo tipo de aplicações estruturais.

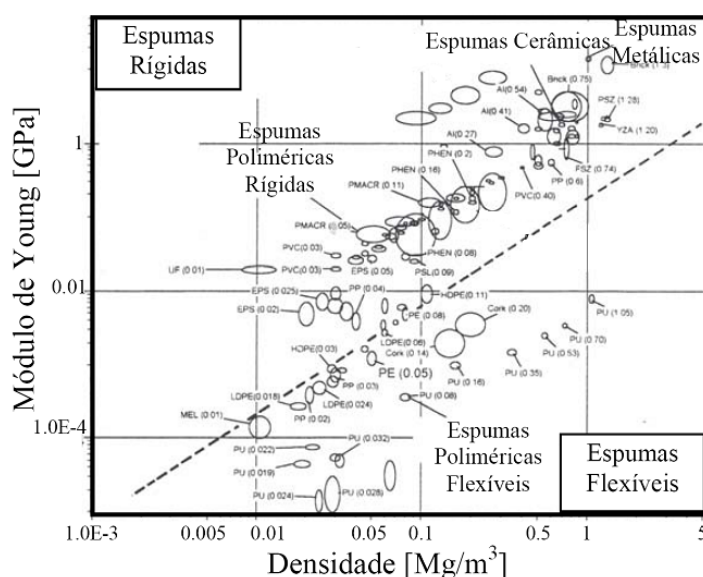


Figura 2.10: Variação do módulo de Young com a densidade para diferentes espumas [2].

2.2.3.2.2. Mecanismos de Deformação

As espumas metálicas, quando submetidas a uma determinada força, desenvolvem mecanismos de deformação específicos relacionados com a sua estrutura celular. O tipo de estrutura influencia o modo como ocorre a deformação das células. No caso de espumas de porosidade fechada, os principais mecanismos de deformação que podem ocorrer quando estas são submetidas a esforços mecânicos são: (i) flexão das paredes celulares, (ii) encurvadura das arestas e alongamento das faces e (iii) mecanismos associados à pressão de gás aprisionado nas células (Figura 2.11).

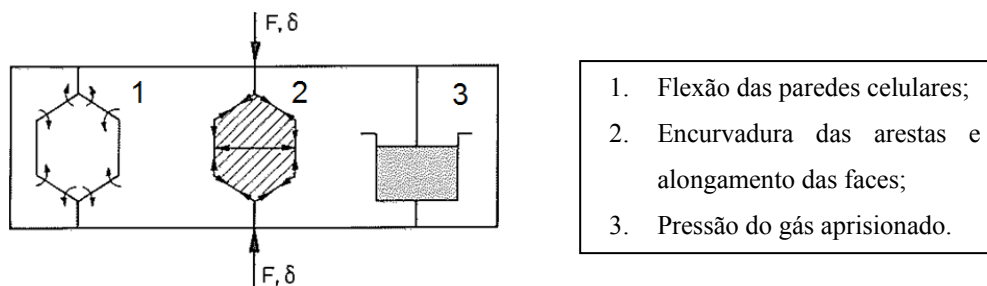


Figura 2.11: Mecanismos de deformação para espumas de células fechadas [3].

A aplicação das espumas metálicas de porosidade fechada como elementos estruturais de absorção de energia deve-se principalmente à forma da curva de tensão-deformação (Figura 2.12). Como se pode visualizar existe uma região em que a espuma pode deformar-se continuamente mantendo uma tensão constante e relativamente baixa.

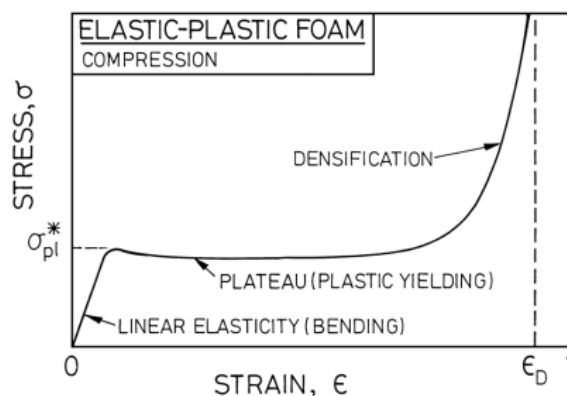


Figura 2.12: Curvas de tensão-deformação de um ensaio de compressão, em que σ_{pl} é a tensão de patamar, σ é a tensão e ϵ é a deformação [3].

As espumas metálicas quando submetidas a esforços de compressão têm um comportamento característico que pode ser dividido em três regiões distintas: deformação elástica (com duas zonas: quase-linear e não-linear), deformação plástica e densificação [2-4].

A etapa inicial correspondente à região de deformação elástica e é composta por uma zona de elasticidade quase linear, seguindo-se a zona de elasticidade não-linear. O carregamento à compressão destas espumas para pequenas deformações origina a sua cedência através dos mecanismos de flexão das paredes celulares e das arestas e alongamento das faces. Se as tensões nas arestas e paredes excederem a tensão limite de cedência σ_{ys} do sólido, é alcançado o início da plastificação e a deformação já não é reversível.

A região de elasticidade linear depende principalmente do tipo da estrutura das células presentes na espuma. No caso das espumas de estrutura fechada, esta região corresponde à zona elástica inicial e

tem como mecanismos associados a flexão, a tração e a encurvadura das arestas celulares e a compressão das membranas que formam as paredes celulares. Assim, neste tipo de espumas, as arestas das células podem sofrer simultaneamente curvatura, alongamento e compressão, enquanto as membranas que formam a elasticidade das faces das células, podem contribuir para o aumento de rigidez nas paredes celulares. Se as membranas não sofrerem ruptura, a compressão do fluido celular que está aprisionado dentro das células também pode contribuir para o aumento da resistência mecânica da espuma.

No entanto, a deformação elástica está limitada a pequenas deformações (5% no máximo) [3]. Esta deformação é recuperável, apesar de apresentar um comportamento não-linear. Devido à não-homogeneidade estrutural das espumas metálicas, as concentrações de tensões excedem o valor da tensão de cedência em alguns elementos da rede estrutural para baixas deformações, o que conduz a uma ‘plastificação’ antecipada da espuma [4]. O aumento de força na espuma causa geralmente a curvatura das arestas e das paredes nas regiões fragilizadas da espuma.

A região de cedência plástica que corresponde à região do patamar da curva tensão-deformação corresponde à concentração de forças de compressão em elementos estruturais, causando instabilidades elásticas e que resulta no aparecimento de deformação plástica.

O início da região do patamar da curva tensão-deformação corresponde a zonas onde a ligação estrutural é mais fraca, com a formação de uma banda de deformação perpendicular à direcção da carga, que se propaga por todo o material a tensão constante e que provoca o colapso plástico das células. Com o aumento de tensão, desencadeiam-se mais bandas de deformação de forma progressiva, até ao momento em que já ocorreu o colapso da maioria das células, atingindo-se a densificação. Dependendo da estrutura celular e das propriedades do sólido, a região do patamar da curva tensão-deformação pode ser plana, ou possuir um pequeno declive ou ondulação.

A tensão de patamar, σ_{pl} , corresponde ao pico de tensão no início do patamar ou à secção plana de tensão. Na ausência deste pico de tensão no início da região do patamar, este valor será extrapolado para pequenas deformações e a intersecção com a linha elástica inicial [4]. A tensão de patamar depende da densidade da espuma e da tensão de cedência do sólido, σ_{ys} [5]. A estimativa da tensão de patamar para espumas de estrutura fechada pode ser feita através do modelo simples de célula cúbica desenvolvido por Gibson e Ashby, isto é:

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} \approx 0.3 \left(\phi \frac{\rho}{\rho_s} \right)^{3/2} + 0.4(1 - \phi) \frac{\rho}{\rho_s} \quad (4)$$

em que σ_{pl} é a tensão de patamar, que aumenta com a densidade (Figura 2.13) [4].

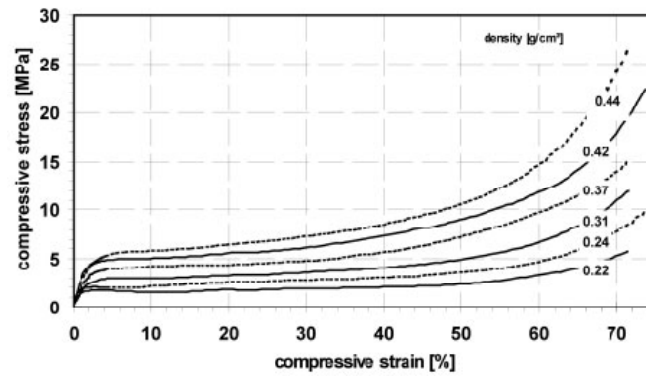


Figura 2.13: Curvas tensão–deformação de ensaios de compressão de espumas de Alumínio, para diferentes densidades [4].

O valor da tensão de patamar é muito importante para caracterizar a capacidade de absorção de energia da espuma e verificar o desempenho à compressão [4].

Na região de densificação, que corresponde à última parte da curva tensão–deformação, ocorre o colapso das células. O aumento do valor de tensão é originado pelo esmagamento das células. O material fica mais compacto e, no limite, a densidade da espuma aproxima-se da densidade do metal base.

2.2.3.2.3. Absorção de energia

As espumas metálicas possuem uma boa capacidade de absorção de energia devido à extensa região de plasticidade evidente na curva tensão-deformação. As espumas metálicas absorvem mais energia para tensões relativamente baixas do que o material de base (Figura 2.14a).

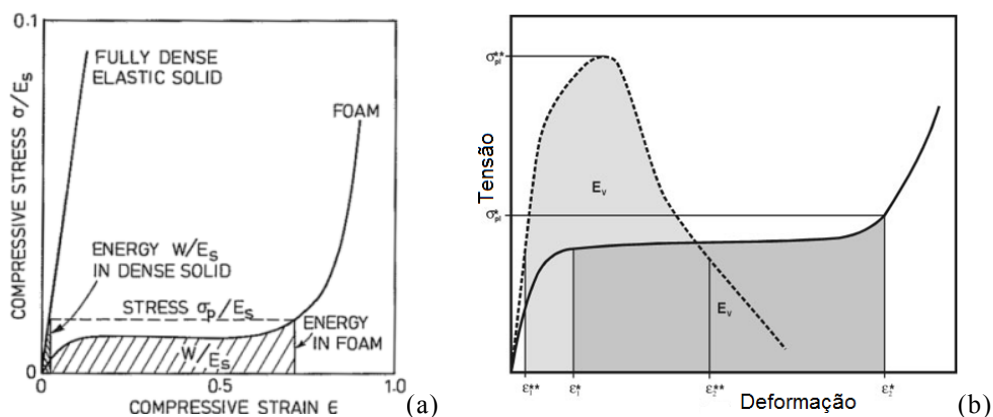


Figura 2.14: (a) Energia absorvida entre uma espuma metálica e o material de base [3]. (b) Curvas de compressão de dois absorvedores com a mesma capacidade de absorção de energia, mas com diferente tensão máxima [4]. Legenda: σ/E_s – tensão de compressão sobre o módulo de Young do material de base, W/E_s – energia absorvida sobre o módulo de Young do material de base, ϵ – deformação; E_v – energia absorvida por unidade de volume.

Os bons absorvedores de energia devem suportar deformações elevadas para um nível de tensão baixo. As espumas metálicas apresentam, para além de baixa densidade, níveis de tensão de patamar relativamente baixos, elevada capacidade de absorção de energia e elevada resistência à temperatura. Deste modo, são materiais adequados para aplicações na indústria de transportes. Para se evitar a deterioração de uma embalagem, ou ferimentos de uma pessoa, as forças de impacto não devem exceder um certo valor. Por isso, não só é importante a capacidade de absorção de energia como também é fundamental a resposta tensão-deformação à compressão. Na Figura 2.14b são apresentadas esquematicamente as curvas de dois absorvedores com a mesma capacidade de absorção de energia em que uma das curvas apresenta um valor de pico de tensão mais elevado [4].

A energia absorvida por unidade de volume (E_V) num determinado intervalo $[\varepsilon_1, \varepsilon_2]$ é igual à área por baixo da curva tensão-deformação e pode ser descrita por [4]:

$$E_V = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5)$$

em que $\sigma(\varepsilon)$ é a tensão em função da deformação e ε é a deformação. Quando a região de patamar é plana, a tensão de patamar é aproximadamente constante e a energia absorvida pode calcular-se com a expressão [3]:

$$E_V \approx \sigma^* \varepsilon \quad (6)$$

em que σ^* é a tensão de patamar.

A eficiência de absorção de energia, η , é dada pelo rácio entre a energia absorvida pelo material real e a energia absorvida por um absorvedor ideal (material plástico ideal, Figura 2.15a) [4].

$$\eta = \frac{\int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma_0(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \quad (7)$$

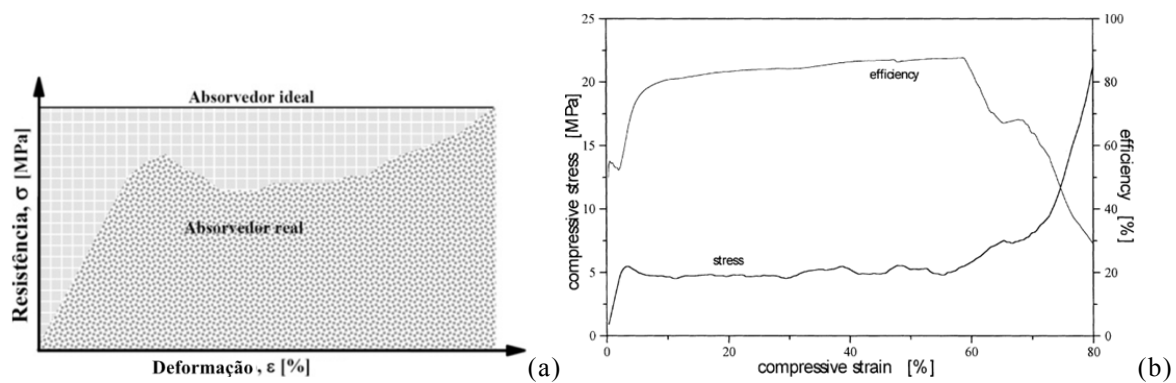


Figura 2.15: (a) Comparação entre um absorvedor real e o ideal [2]. (b) Curvas tensão-deformação e de eficiência de absorção de energia de espuma de liga AlSi12 ($\rho=0,36 \text{ g/cm}^3$) [16].

A maioria das espumas metálicas exibe um patamar (Figura 2.12), apresentando uma elevada eficiência de absorção de energia para um dado intervalo de deformação [4]. Na Figura 2.15b pode visualizar-se a relação entre a curva de eficiência de absorção de energia e a curva de tensão-deformação de um ensaio de compressão para uma espuma de liga de Alumínio.

A capacidade de absorção de energia e o comportamento ao impacto das espumas metálicas dependem principalmente da densidade da espuma. Para cada densidade existe um valor mínimo de tensão de cedência. Na Figura 2.16a comparam-se as curvas de compressão de espumas metálicas de um mesmo material com diferentes densidades. A energia absorvida é a mesma para todas as densidades e é representada pela área sombreada por baixo de cada curva. A espuma de densidade intermédia é aquela que mantém a tensão mais constante quando absorve a energia, comparativamente com as restantes espumas.

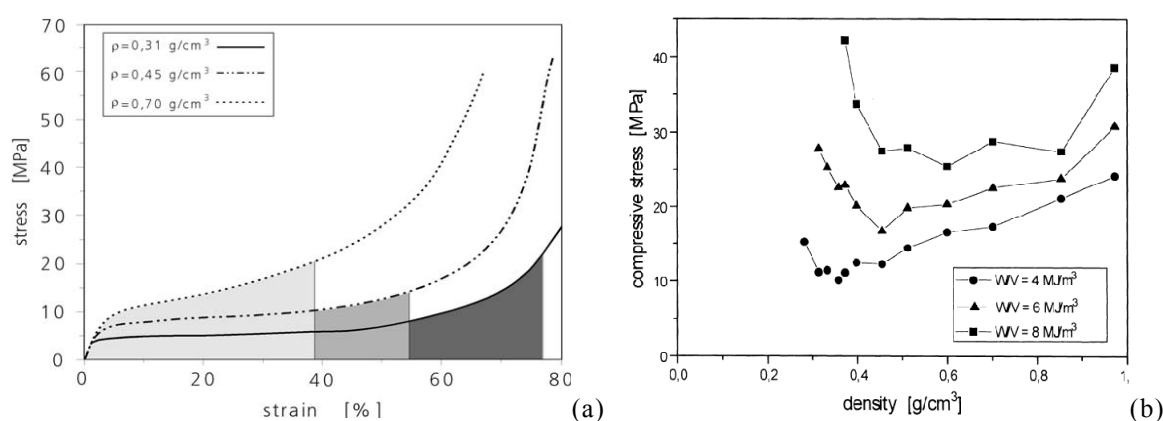


Figura 2.16: (a) Absorção de energia para espumas metálicas com diferentes densidades [17]. (b) Variação da tensão com a densidade de espumas de Alumínio com diferentes capacidades de absorção de energia por unidade de volume [16].

No regime de densificação a eficiência diminui com um aumento da tensão. A escolha dos absorsores de energia pode ser feita através de diagramas de absorção de energia. Para tal, espumas metálicas com diferentes densidades são testadas à compressão, a velocidade de deformação e temperatura constantes. A área abaixo de cada curva representa a energia absorvida por unidade de volume (W/V) (Figura 2.16b) [2].

As espumas metálicas têm vindo a mostrar uma maior capacidade de absorção e dissipação de energia comparativamente com outros tipos de espumas (Figura 2.17), pelo que poderão ser utilizadas como componentes estruturais nos veículos para aumentar a segurança passiva dos passageiros [2, 18].

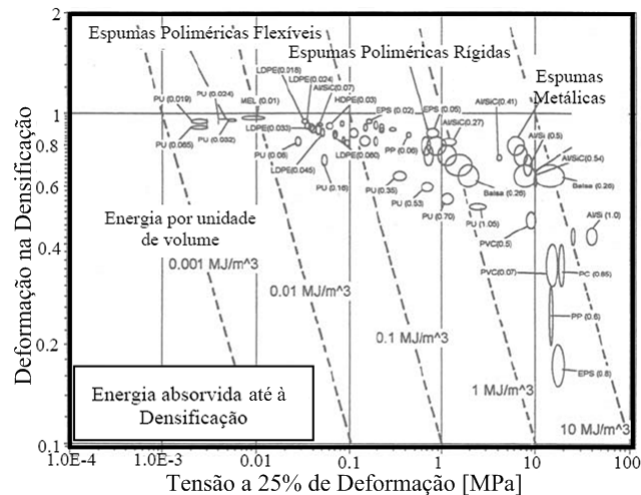


Figura 2.17: Capacidade de absorção de energia para vários tipos de espumas [2, 3].

2.2.3.3. Propriedades Térmicas

As principais propriedades térmicas são o ponto de fusão, calor específico, coeficiente de expansão térmica, condutividade térmica, difusibilidade térmica, emissividade da superfície e resistência ao choque térmico e ao fogo. No caso das espumas metálicas, algumas destas propriedades aproximam-se das propriedades do material base, outras dependem da sua estrutura porosa [4].

O ponto de fusão da espuma é praticamente igual ao do metal de base. No entanto, existem alguns metais que sofrem alterações durante o processo de fabrico. Por exemplo, no caso de uma espuma de Alumínio, a superfície é coberta por uma camada oxidada contínua que origina valores mais elevados do ponto de fusão da espuma. Esta superfície aumenta com o aumento de porosidade e diminuição do tamanho do poro. Se a estrutura é aquecida em ar ou numa atmosfera oxidante até a uma temperatura próxima da temperatura de fusão durante um intervalo de tempo longo, verifica-se um aumento da espessura desta camada óxido, tornando o material mais estável [4].

O calor específico, c_p , é a energia requerida para subir uma unidade de temperatura por uma unidade de massa de um material (geralmente medido em $\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$). O calor específico de um sistema bifásico é simplesmente dado pela soma do calor específico das fases multiplicada pela fracção de massa. Numa espuma de baixa densidade a fracção de massa de gás é baixa e, por conseguinte, o calor específico da espuma é aproximadamente igual ao do material de base.

O coeficiente de expansão térmica das espumas metálicas é aproximadamente o mesmo que o do material de base. Se uma espuma de porosidade fechada é arrefecida até muito baixas temperaturas ou aquecida para elevadas temperaturas, o coeficiente de expansão térmica pode não ser igual ao esperado no metal de base por causa do comportamento do gás interno. O arrefecimento da espuma

até baixas temperaturas pode provocar o colapso das células. O aquecimento para altas temperaturas provoca a expansão do gás originando uma pressão resultante que pode expandir a própria espuma [3].

A condutividade térmica das espumas metálicas é atribuída apenas às paredes metálicas das células (condutividade térmica do metal base). Deste modo, a condutividade térmica da espuma depende principalmente da condutividade térmica do material de base, diminuindo com a diminuição da densidade da espuma. A condutividade térmica nas espumas de estrutura fechada é baixa comparando com o material base, oferecendo um grau de protecção ao fogo em, por exemplo, uma divisória dum automóvel entre o motor e o compartimento de passageiros. A condutividade térmica (K) é definida pela seguinte equação de acordo com a lei de Fourier [19]:

$$q = -KA \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

Em que q é a taxa de transmissão de calor, dT/dx é o gradiente de temperatura e A é a área da secção de condução de calor.

Muitas espumas são usadas para isolamento térmico. Vários factores são combinados para limitar o fluxo de calor nas espumas: a baixa fracção de volume da fase sólida; a pequena dimensão do poro que virtualmente suprime a convecção e reduz a radiação através da repetida absorção e reflexão pelas paredes celulares [3]. A condutividade térmica depende da densidade relativa da espuma e pode ser aproximada pela seguinte expressão [20]:

$$K \approx K_s \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^q \quad (9)$$

com q entre 1,65 e 1,8 e em que K é a condutividade térmica da espuma e K_s a condutividade térmica do metal de base.

2.2.4. Aplicações

O estudo das propriedades das espumas metálicas permitiu compreender as diversas aplicações deste material. O número de aplicações tem vindo a aumentar nos diversos sectores industriais. Geralmente, na identificação da viabilidade de uma possível aplicação tem-se em consideração os seguintes factores [2]:

- Morfologia: estrutura das células (aberta ou fechada), percentagem de porosidade e distribuição de tamanho de poros;

- Metalurgia: composição química e microestrutura da liga metálica (material de base);
- Processo de fabrico: a escolha do processo de fabrico, feita consoante o tipo de geometria pretendido para o componente que pode ter uma geometria complexa, na forma de chapa, ou mesmo em perfil;
- Economia: custos envolvidos no processo e viabilidade para a produção em grande escala.

As principais aplicações das espumas estão relacionadas, essencialmente, com a sua estrutura celular, como se pode visualizar na Figura 2.18, em que se indicam as propriedades mais relevantes para cada tipo de aplicação [2]. As espumas metálicas podem ainda ser classificadas consoante o seu potencial para aplicação estrutural ou funcional. As espumas de porosidade fechada têm aplicações essencialmente estruturais. As espumas de células abertas podem ser usadas na indústria química, como filtros, reservatórios de armazenamento de fluidos, permutadores de calor, *etc.* Tal acontece devido a factores como a porosidade aberta, a elevada área específica e a baixa condutividade térmica e eléctrica [2].

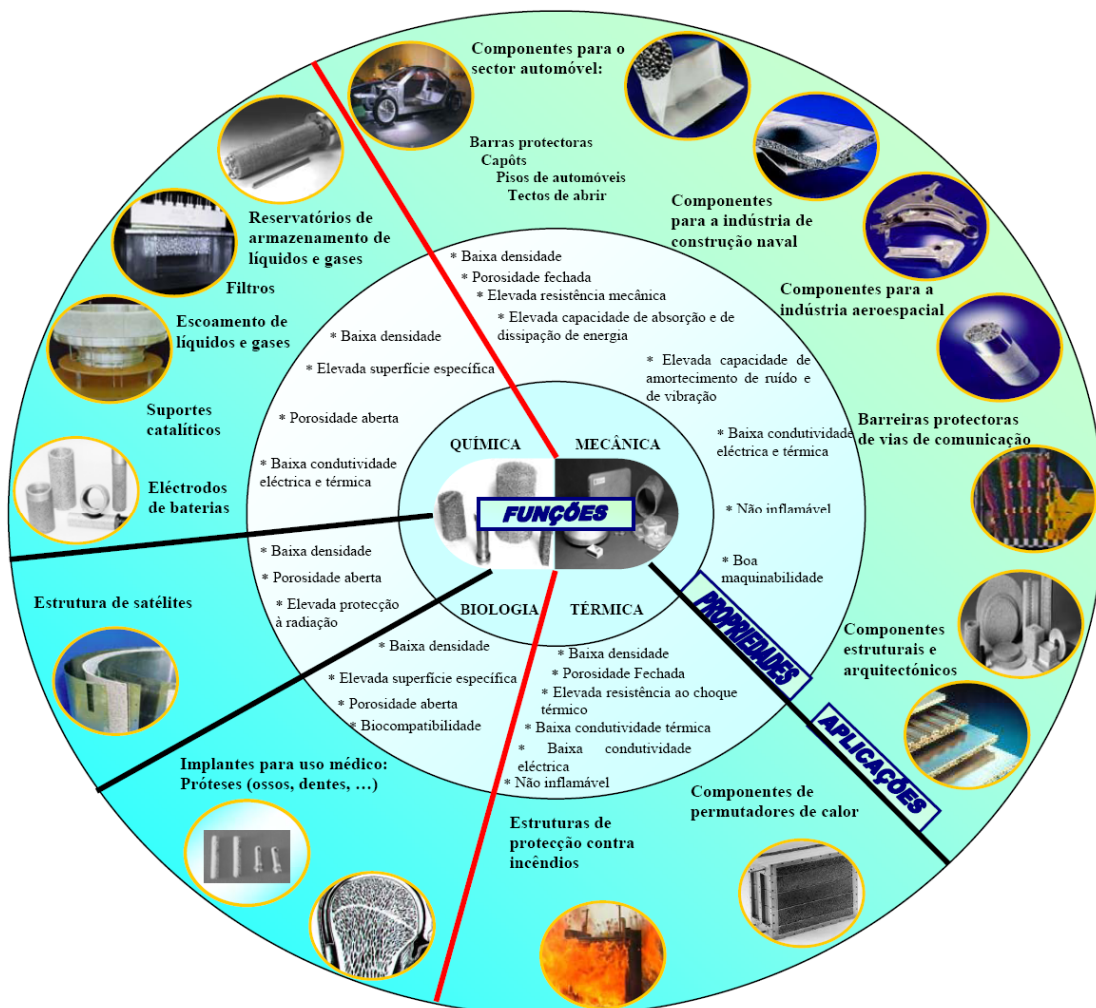


Figura 2.18: Aplicações das espumas metálicas [2].

As espumas de estrutura fechada e, em particular as espumas de liga de Alumínio, apresentam as suas principais aplicações no domínio da indústria de transportes [2, 18], devido às suas principais propriedades (baixa densidade, boa capacidade de absorção de energia e amortecimento de vibrações) (Figura 2.19).

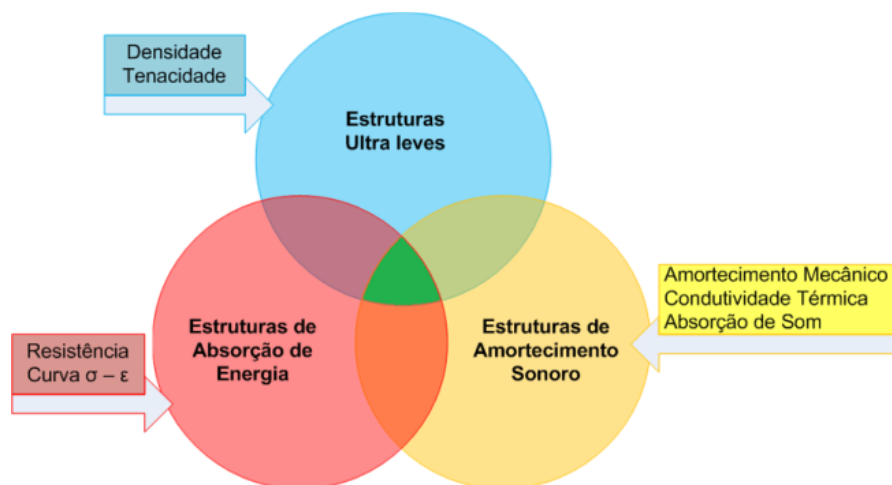


Figura 2.19: Potenciais aplicações estruturais de espumas metálicas no sector dos transportes.

A incorporação de componentes de espuma de Alumínio num veículo faz com que o consumo de combustível do veículo diminua, devido à diminuição do seu peso total, e origina um aumento da segurança passiva e activa dos passageiros (Figura 2.20).

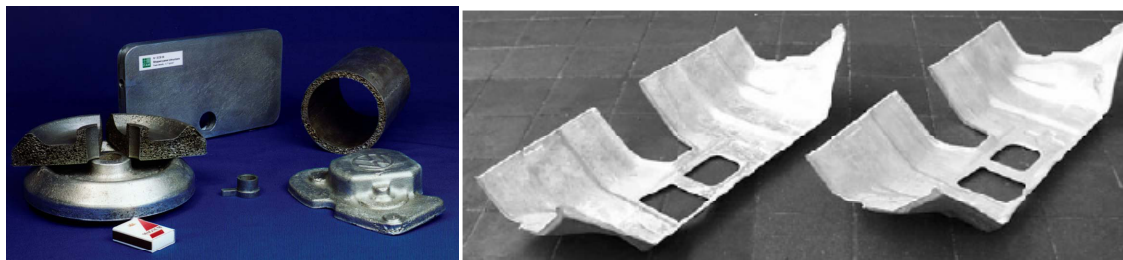


Figura 2.20: Componentes em espuma metálica [4, 17].

2.2.4.1. Indústria Automóvel

Devido ao tratado de Quioto e devido ao facto de se ter identificado que o sector dos transportes tem uma forte contribuição para a poluição atmosférica e emissões de CO_2 a nível mundial [21], os fabricantes de automóveis deparam-se com a necessidade/obrigatoriedade de produção de veículos com índices mais baixos de emissões de poluentes e com menores consumos. Assim, a indústria automóvel tem vindo a produzir veículos cada vez mais económicos e menos poluentes, com o

desenvolvimento de motores mais eficientes, com a redução do peso e melhoramento da aerodinâmica do automóvel.

Na indústria automóvel ainda existem duas preocupações durante a concepção e a construção de um novo veículo, que consistem no aumento da segurança activa e passiva dos passageiros. Por norma o aumento do peso do automóvel confere uma melhoria da segurança, mas tem como consequência um aumento no consumo de combustível.

Actualmente, assiste-se à tendência do fabrico de veículos compactos para uso citadino, principalmente na Europa e no Japão, devido aos problemas existentes de mobilidade urbana [2]. A redução do comprimento do veículo não significa uma diminuição do habitáculo dos passageiros, mas na diminuição de outros compartimentos, como a bagageira ou o compartimento do motor, de forma a manter o conforto dos passageiros. Este tipo de concepção origina outros problemas, como o aumento de dissipação de calor proveniente do motor e restantes componentes móveis e a possível redução das zonas de impacto do veículo que pode comprometer a segurança. Estes problemas podem ser melhorados com a incorporação de espumas metálicas de porosidade fechada.

Um caso prático desta situação verifica-se na utilização de painéis estruturais ultra-leves de espumas metálicas incorporados nas zonas de impacto, onde coexistem simultaneamente funções de absorção de energia, de amortecimento sonoro e de dissipação de calor, como mostra a Figura 2.21.

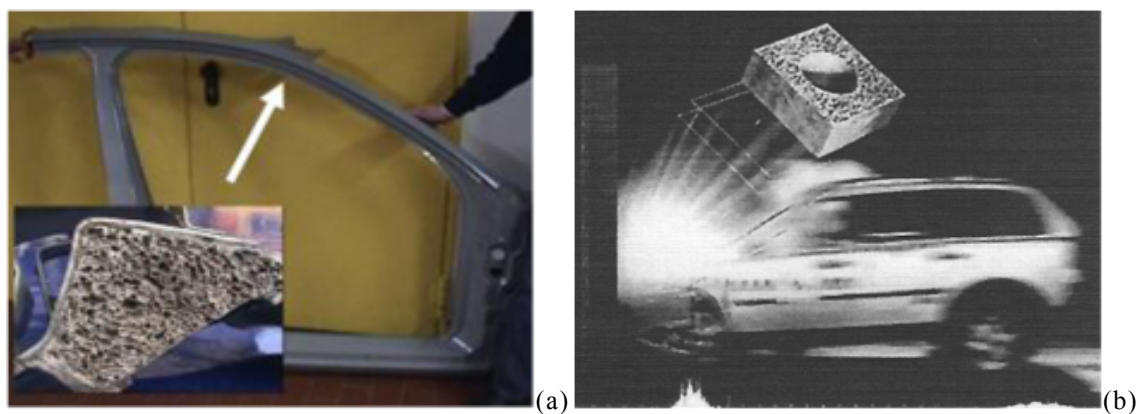


Figura 2.21: Integração de espuma metálica num automóvel: (a) estrutura de protecção lateral [22] e (b) estrutura de absorção de impacto [13].

2.2.4.2. Indústria Aeroespacial

Na indústria aeroespacial tem-se testado a substituição de estruturas do tipo favo-de-mel (Figura 2.1a) por estruturas em espumas de Titânio e de Alumínio. Uma das vantagens é a possibilidade de fabrico de componentes tridimensionais, em contraste com as actuais estruturas planas do tipo favo-de-mel, sendo aplicadas na produção de vedantes e pás de turbinas [2].

As espumas de Alumínio têm sido testadas em estruturas de absorção de energia de impacto (*e.g.* calços de aterragem de veículos espaciais) e no reforço nas estruturas de colheita de amostra nos satélites, substituindo os materiais que não são resistentes a condições ambientais adversas.

2.2.4.3. Indústria da Construção Naval

Actualmente, os navios de passageiros podem ser construídos por Alumínio extrudido, chapas de Alumínio e estruturas de Alumínio do tipo favo-de-mel. Painéis do tipo *sandwich* de núcleo de espuma de Alumínio de grandes dimensões têm vindo a ser testados para substituição de algumas estruturas actualmente usadas (Figura 2.22). As potenciais aplicações das espumas metálicas na construção naval são plataformas elevatórias, anteparas estruturais, plataformas de antena e compartimentos pirotécnicos [2, 23].

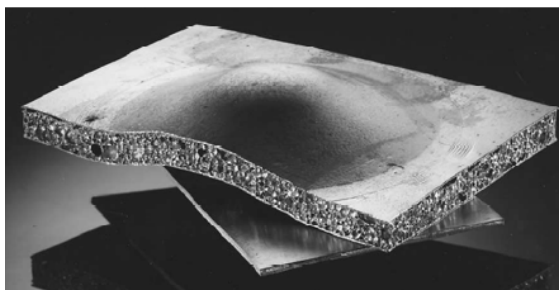


Figura 2.22: Painel tipo *sandwich* formado por duas chapas de aço com núcleo em espuma de Alumínio [6].

2.2.4.4. Indústria Ferroviária

As aplicações das espumas metálicas na indústria ferroviária são semelhantes às do sector automóvel. Os comboios no Japão têm vindo a ser equipados com blocos de espuma de Alumínio nas zonas de absorção de energia de impacto [2, 23].

2.3. Alumínio e Suas Ligas

As propriedades das espumas metálicas derivam da conjugação das características celulares com as propriedades do material de base da espuma. No caso das espumas metálicas em estudo, o material de base é uma liga de Alumínio-Silício. Durante o processo de fabrico da espuma (pulverotecnologia), o material precursor composto por pós de Alumínio, pós de Silício (7%) e pós de agente expensor (TiH_2) foi submetido a temperaturas superiores à temperatura de fusão do Alumínio, o que resultou na interligação destes elementos químicos, formando a liga de Alumínio-Silício.

2.3.1. Propriedades gerais

O Alumínio (Al) é um metal que possui baixa densidade ($2,7 \text{ g/cm}^3$, cerca de um terço da do aço e ligas de Cobre), cor prateada e é reciclável. Este metal apresenta uma ductilidade elevada, permitindo conformação de componentes com elevadas taxas de deformação [24]. A sua temperatura de fusão é de cerca de 660°C , o que limita a temperatura de trabalho destas ligas [25]. Este material possui uma boa condutividade eléctrica e térmica (cerca de 50 a 60% da condutividade do Cobre) e não é ferro-magnético, tem também uma elevada reflectividade ao calor e a luz. O Alumínio é um material com boa resistência à corrosão quer atmosférica, quer em meio aquoso, óleos e diversos solventes, conferida pela camada protectora de óxido (alumina, Al_2O_3). Na Tabela 2.2 mostram-se as propriedades mais relevantes do Alumínio.

Tabela 2.2: Propriedades do Alumínio puro [26].

Property	Unit	Value	Note
Atomic number		13	
Density, ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2698 ⁽¹⁾	
Melting point	$^\circ\text{C}$	660.45	$< 1013 \times 10^{-3} \text{ bar}$
Boiling point	$^\circ\text{C}$	2056	$< 1013 \times 10^{-3} \text{ bar}$
Vapour pressure	Pa	3.7×10^{-3}	at 927°C
Mass internal energy, u	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.98×10^5	
Mass thermal capacity, C_p	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	897	at 25°C
Thermal conductivity, λ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	237	at 27°C
Linear expansion coefficient, α_1	10^{-6} K^{-1}	23.1	at 25°C
Electrical resistivity, ρ	$10^{-9} \Omega\cdot\text{m}$	26.548	at 25°C
Magnetic susceptibility, K		0.6×10^{-3}	at 25°C
Longitudinal elasticity modulus, E	MPa	69 000	
Poisson's ratio, ν		0.33	

O Alumínio forma ligas com o Manganês (Mn), Cobre (Cu), Magnésio (Mg), Silício (Si), Ferro (Fe), Níquel (Ni), Lítio (Li), *etc.* Algumas ligas possuem resistência mecânica superior aos aços estruturais [27]. A “The Aluminium Association”, em 1954, uniformizou a designação das ligas de Alumínio (Tabela 2.3). Este sistema é constituído por 4 algarismos, em que o primeiro indica o tipo de liga e define o principal elemento de liga, o segundo indica a modificação da liga original ou limites de impureza (número zero é usado para a liga original, e 1 até 9 indica as modificações da liga) e os restantes dois algarismos servem para identificação da liga no grupo.

As ligas de Alumínio podem ainda ser divididas em dois grupos:

- Ligas conformadas ou trabalhadas (wrought alloys): destinadas à fabricação de produtos semi-acabados, como laminados planos (placas, chapas e folhas), laminados não-planos (barras e arames), perfis extrudidos e componentes forjados.
- Ligas fundidas (cast alloys): ligas destinadas à fabricação de componentes fundidos.

Tabela 2.3: Nomenclatura das ligas de Alumínio (“The Aluminium Association”) [28].

Ligas de Alumínio			
Designação de ligas trabalhadas		Designação de ligas fundidas	
Série da Liga	Elementos majoritários na liga	Série da Liga	Elementos majoritários na liga
1xxx	Mais de 99% de Alumínio	1xx.x	Mais de 99% de Alumínio
2xxx	Cobre	2xx.x	Cobre
3xxx	Manganês	3xx.x	Silício, cobre e/ou magnésio
4xxx	Silício	4xx.x	Silício
5xxx	Magnésio	5xx.x	Magnésio
6xxx	Magnésio e silício	6xx.x	Série não utilizada
7xxx	Zinco	7xx.x	Zinco
8xxx	Outros elementos	8xx.x	Estanho
9xxx	Série não utilizada	9xx.x	Outros elementos

Neste trabalho foram utilizadas amostras com o material base da liga de Alumínio com Silício (AlSi7) que corresponde à série 4xxx. O Silício é o principal elemento de liga da série 4xxx. A maior parte das ligas desta série não são tratáveis termicamente. O Silício pode ser adicionado para baixar a temperatura de fusão sem provocar fragilidade excessiva. A liga 4032 forjada, que contém 12,2% de Silício, tem boa maleabilidade e baixo coeficiente de expansão térmica. Esta é usada para pistões forjados de automóveis. As ligas de AlSi são excelentes para fundição, apresentam uma boa resistência à corrosão, boa resistência à tracção e uma excelente ductilidade. A liga 13 (12% de Silício) e a liga 43 (5% de Silício) são usadas para fundições complexas, para equipamento que contacte com produtos alimentares, instalações ou ferramentas marítimas [27].

2.3.2. Comportamento à corrosão

A corrosão atmosférica baseia-se no ataque que um metal ou liga metálica sofre devido às condições atmosféricas que este está exposto. Esta corrosão pode ser causada por vários tipos de ataques, como a água da chuva ou água condensada, o Oxigénio contido no ar e poluentes atmosféricos. A corrosão atmosférica é um tipo especial de corrosão porque o electrólito é representado por uma fina camada de uma mistura, cuja espessura não ultrapassa cerca de cem micrómetros. O Alumínio sofre pouca corrosão quando exposto ao ar, devido à alumina que se forma espontaneamente na superfície através da seguinte reacção [26]:



A superfície do Alumínio pode ser facilmente saturada por Oxigénio. Este tipo de corrosão pode ser intermitente, porque pára quando a superfície metálica já não está húmida. Os parâmetros da corrosão atmosférica são a humidade relativa, chuva, nevoeiro, condensação, temperatura, poluentes gasosos, poeiras e alternância de humidade [26].

Em termos de condições ambientais, a temperatura não tem influência significativa na corrosão atmosférica do Alumínio. Em geral, entre -26 e +25°C não há qualquer efeito da temperatura. Mesmo nas zonas tropicais, mais húmidas e quentes, não se verificou qualquer diferença quando comparando com testes em zonas temperadas. Isto explica porque nas zonas temperadas, a relação da corrosão é só levemente influenciada pelas variações sazonais de temperatura [26].

A corrosão atmosférica está relacionada com o nível de humidade relativa que o ar contém. A humidade relativa é a razão entre a pressão de vapor de água (P_{vapor}) e a máxima pressão de vapor P_{sat} (i.e de saturação) que ocorre a uma dada temperatura:

$$HR = \frac{P_{vapor}}{P_{sat@T}} \times 100 \quad (14)$$

A humidade relativa também pode ser descrita como a relação entre a quantidade de vapor de água existente na atmosfera, a uma dada temperatura, e a máxima quantidade de vapor de água que satura o ar para essa mesma temperatura e pode ser calculada a partir da equação de Clausius–Clapeyron.

Para temperatura ambiente, o ar é considerado: (i) seco se $HR < 30\%$; (ii) normal se $50 < HR < 60\%$; (iii) húmido se $HR > 80\%$ e (iv) saturado se $HR = 100\%$.

Nos desertos ou zonas áridas, a humidade relativa raramente excede 10 a 20%, enquanto que nos climas temperados varia entre 40 e 60%. Quando ocorrem aguaceiros, a humidade relativa pode

atingir os 90 a 95%. Nas regiões tropicais, na época das chuvas, atinge-se perto de 100% de humidade relativa.

Vernon mostrou que existe um limiar inferior crítico de humidade relativa abaixo do qual os metais comuns não corroem porque existe uma mistura insuficiente para criar um filme electrolítico na superfície do metal. Numa superfície acabada de ser preparada e num ar não poluído, o limiar crítico de humidade relativa para o Alumínio é 66% [26]. O limiar crítico de humidade relativa não é um valor constante mas depende da condição da superfície metálica. Uma superfície rugosa com ranhuras, pó, produtos da corrosão ou sais depositados na superfície irá diminuir o nível crítico de humidade relativa por capilaridade. Estes factores também favorecem a condensação (Figura 2.23).

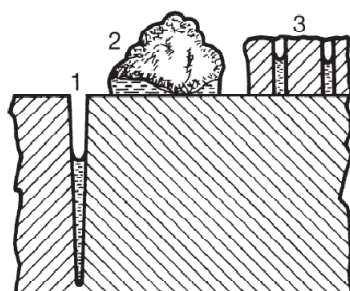


Figura 2.23: Mecanismos de corrosão da superfície: (1) micro fractura (2) presença de poeiras e (3) formação de um produto poroso [26].

A corrosão atmosférica de metais desenvolve uma mistura num filme fino depositado na superfície do metal. A espessura do filme raramente excede os 100 μm , excepto durante a estação chuvosa, que aumenta com o aumento da humidade relativa do ar. Quando os gases poluentes estão dissolvidos, especialmente o dióxido de Enxofre e componentes inorgânicos em pó, a mistura do filme pode tornar-se num electrolito condutor, dependendo da quantidade e natureza dos elementos dissolvidos. A sua concentração pode exceder 100 mg/l. Estes filmes finos oferecem uma baixa resistência à difusão de Oxigénio. Como consequência, certas reacções electroquímicas que envolvem Oxigénio podem tomar lugar mais rapidamente do que quando o metal é imerso num líquido.

A intensidade da corrosão é muito fraca nesses filmes finos, existindo duas razões para isso. Uma deve-se ao facto de o Oxigénio do ar contribuir para a formação da camada natural de óxido, e assim mais fino é o filme, mais fácil a difusão. A outra razão reside na baixa quantidade de água disponível limitar a dissolução de certos elementos e produtos corrosivos, que será assim resíduo na superfície, protegendo-a.

O Alumínio mesmo que não protegido tem mostrado ter uma boa resistência às condições ambientais (superior ao aço) [26].

Na corrosão atmosférica do Alumínio existem três estágios distintos. Um estágio inicial, em que a corrosão se inicia em locais fragilizados do filme oxidado. A iniciação da corrosão é muito rápida, em apenas alguns dias. Um período de transição, que pode durar vários meses ou anos. Durante este período, a acumulação de produtos da corrosão e depósitos abrandam o processo de corrosão. Na maioria dos casos, a taxa de corrosão não aumenta a partir de 2 anos. Um período de estabilização, em que os mecanismos da corrosão se tornam demasiado lentos [26].

Capítulo 3 – Análise Experimental

3.1. Materiais

Neste trabalho foram usadas espumas de uma liga de Alumínio com 7% em peso de Silício (liga AlSi7) de geometria cilíndrica com 30 mm de diâmetro e 30 mm de altura. As espumas foram obtidas pelo método de pulverotecnologia e apresentam uma estrutura interna de poros fechados e uma película externa densa, como se pode ver na Figura 3.1. Foi ainda observada a microestrutura do material precursor que deu origem a esta espuma, de forma a observar a distribuição do agente expensor e a distribuição das partículas de Silício na matriz de Alumínio (Figura 3.2).



Figura 3.1: Algumas amostras de espuma de liga AlSi7.



Figura 3.2: Material precursor.

3.2. Metodologia

O estudo da influência das condições ambientais nas propriedades das espumas de Alumínio foi realizado recorrendo à metodologia esquematizada na Figura 3.3. As amostras de espuma foram caracterizadas em termos físicos (densidade), estruturais e mecânicos. Os testes ambientais realizados nas amostras consistiram em colocar amostras de espumas no interior de uma câmara climática com controlo de humidade relativa, temperatura e tempo.



Figura 3.3: Esquema da metodologia utilizada na análise experimental.

A avaliação das propriedades mecânicas das espumas submetidas às diferentes condições ambientais foi efectuada através da realização de ensaios de compressão numa máquina universal de ensaios.

As amostras estudadas foram caracterizadas antes e após serem submetidas às diferentes condições ambientais (Figura 3.3). Para cada condição ambiental, as alterações da estrutura celular foram observadas por microscopia, análise de imagem e difracção de raios-X. Adicionalmente, as amostras foram caracterizadas em termos de densidade antes e após serem submetidas a cada condição ambiental.

3.2.1. Testes Ambientais

Os testes ambientais foram realizados numa câmara climática *TIRAclima* TCC 4034, que permite variação de temperatura entre -40°C e $+180^{\circ}\text{C}$ e variação da humidade relativa entre 10% e 98%, para temperaturas entre $+5^{\circ}\text{C}$ e $+95^{\circ}\text{C}$ (Figura 3.4). Na Tabela 3.1 apresentam-se os diferentes testes realizados neste trabalho. Para cada condição ambiental foram utilizadas três amostras de espuma de Alumínio.

Tabela 3.1: Descrição dos testes ambientais efectuados.

Teste	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Temperatura	-20°C		0°C		40°C		100°C			160°C		
Humidade Relativa	60% HR						0% HR					
Tempo	24h	48h	24h	48h	24h	48h	24h	48h	120h	24h	48h	120h



Figura 3.4: (a) Câmara ambiental TIRAclima TCC 4034 e (b) painel de controlo da câmara para programação da temperatura e humidade relativa.

A câmara foi previamente programada através da introdução de ciclos térmicos de aquecimento ou arrefecimento desde a temperatura ambiente até à temperatura pretendida, para um dado intervalo de tempo. Por limitações experimentais e de equipamento, as velocidades até à temperatura predefinida não foram iguais (Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Velocidades utilizadas para cada temperatura.

Temperatura [°C]	-20	0	20	40	100	160
Velocidade [°C/min]	0,5	1	-	1	4,5	4,5

As amostras foram colocadas no interior da câmara climática previamente programada para uma dada condição ambiental, à temperatura ambiente. Ao fim do tempo predefinido para cada condição ambiental, as amostras eram removidas da câmara climática e arrefecidas ou aquecidas ao ar até à temperatura ambiente.

3.2.2. Ensaios Mecânicos

Os ensaios de compressão foram realizados recorrendo à máquina de ensaios universal Shimadzu, AG-50kNG (Figura 3.5a) com uma célula de carga de 50kN, à temperatura ambiente com uma velocidade de carregamento constante e igual a 1mm/min. Os ensaios de compressão foram realizados usando duas amostras para cada condição ambiental. Foram ainda realizados ensaios de compressão a amostras que não foram submetidas a qualquer condição ambiental. Na Figura 3.5b mostra-se o comportamento de uma amostra durante o ensaio de compressão.

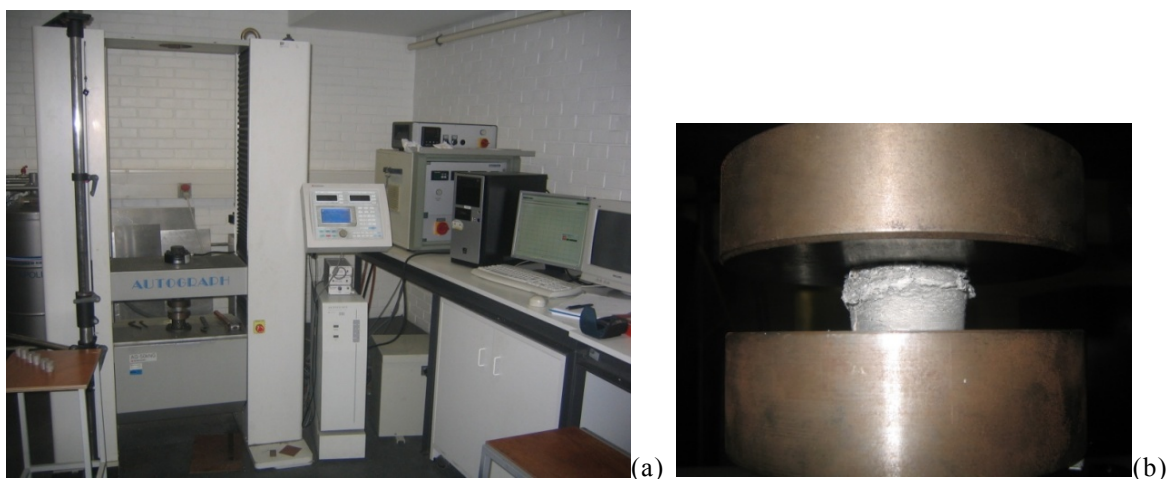


Figura 3.5: (a) Máquina de ensaios universal. (b) Visualização de uma amostra de Alumínio durante o ensaio de compressão.

O tratamento dos dados foi efectuado em programas apropriados, que permitiram a realização dos cálculos, das tabelas e dos gráficos com as curvas força-deslocamento e energia-deslocamento apresentados ao longo do trabalho.

O estudo da influência das condições ambientais nas propriedades mecânicas das espumas foi levado a cabo através da comparação das curvas de força–deslocamento em compressão e de energia absorvida.

3.2.3. Método de Determinação da Densidade

A densidade é uma das características físicas mais importantes destes materiais, o que faz com que estes sejam competitivos relativamente a outros materiais em aplicações estruturais.

A densidade das espumas foi determinada através do método geométrico (quociente entre a massa da amostra e o seu volume). A determinação da massa das amostras foi conseguida usando uma balança electrónica digital (A&D Instruments) com capacidade máxima de 210g e mínima de 10mg

(erro=1mg, desvio=0,1mg). O volume das amostras foi calculado através da medição da altura e do diâmetro usando uma vulgar craveira da marca Mitutoyo com uma precisão 0,05mm.

O valor da densidade relativa das espumas é o quociente entre a densidade da amostra e a densidade do metal sólido constituinte da espuma [29].

3.2.4. MO – Microscopia Óptica

A estrutura celular, a anisotropia e a morfologia dos poros celulares das espumas de Alumínio estudadas neste trabalho foram observadas recorrendo a um microscópio óptico, mais particularmente, o microscópio óptico permitiu observar e medir os seguintes parâmetros:

- Poros: distribuição de dimensão, tamanho médio, forma e geometria (cilíndrica e poliédrica);
- Paredes celulares: espessura, intersecções;
- Película externa: espessura;
- Presença de defeitos nas paredes celulares, ...;

O microscópio óptico foi ainda usado para observar a microestrutura do material precursor que deu origem a estas espumas.

A preparação das amostras de espuma de Alumínio estudadas para a observação ao microscópio consistiu no corte ao meio no sentido da direcção do processo de expansão (Figura 3.6), seguido do polimento. O polimento foi efectuado com a sequência de lixas de polimento: P500, P1000, P1200 e P2400 numa bancada de polimento.

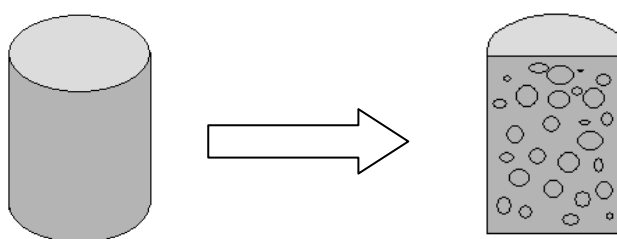


Figura 3.6: Esquema de corte das amostras de espuma de Alumínio.

A observação foi realizada num microscópio óptico Nikon Eclipse LV150, com objectivas Nikon LU Plan Fluor e ampliação 5, 10, 20, 50 e 100x (Figura 3.7).



Figura 3.7: Microscópio óptico Nikon Eclipse LV150.

3.2.5. MEV- Microscopia Electrónica de Varrimento

O microscópio electrónico de varrimento (MEV) é um tipo de microscópio electrónico capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra [31]. As imagens de MEV têm uma aparência tridimensional característica e são úteis para avaliar a estrutura superficial de uma amostra.

O princípio de funcionamento do microscópio electrónico de varrimento consiste no varrimento da superfície da amostra, com um feixe de electrões finamente focado, modulando o brilho em cada ponto da imagem obtida num ecrã de visualização de tubo de raios catódicos (monitor) pelo sinal emitido pela amostra. Deste modo, consegue-se uma correspondência, ponto a ponto, entre a imagem e a região da amostra que é observada, dependendo da natureza da informação contida na imagem obtida e do tipo de sinal recolhido pelo detector utilizado [32].

Na microanálise de raio-X, quando se faz incidir um feixe de energia muito elevada (electrões acelerados ou fótons) sobre o material, este imite radiações de raios-X, cujas energias são características dos elementos que o constituem. Um espectrómetro de raio-X utilizado é o espectrómetro de dispersão de energia (EDS) que é a determinação do espectro de energias dos fótons emitidos por medida directa da energia absorvida por um sistema detector que aproveita as propriedades ionizantes da radiação [21].

A análise qualitativa corresponde à identificação dos elementos presentes num ponto ou numa área determinada da superfície da amostra sobre a qual incide o feixe electrónico. Nos equipamentos

mais recentes é possível obter uma imagem da distribuição de um elemento na amostra ao longo de um perfil ou de uma área previamente seleccionada – designados por mapas de raio-X [32].

O microscópio electrónico utilizado foi o microscópio electrónico de varrimento, analítico e de alta resolução, de emissão Schottky (SE) Hitachi SU-70, com um sistema de microanálise por espectrometria de dispersão de energias de raios-X/EDS Bruker QUANTAX 400, para realizar a análise de elementos a partir do espectrómetro de dispersão de energia (EDS) (Figura 3.8).

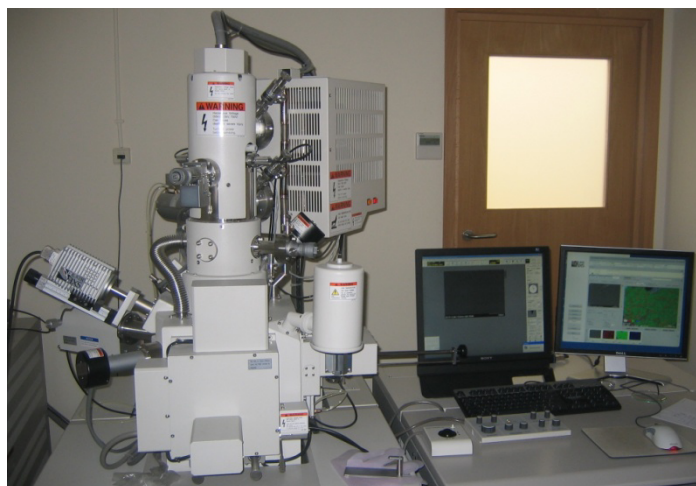


Figura 3.8: Microscópio electrónico de varrimento (HR-FESEM Hitachi SU-70).

A preparação das amostras para se observarem no MEV foi semelhante à preparação do microscópio óptico, diferindo apenas na dimensão ($10 \times 10 \times 2$ [mm³]) (Figura 3.9). Para a sua observação, as amostras foram colocadas num suporte próprio, com uma fixação com cola de carbono.

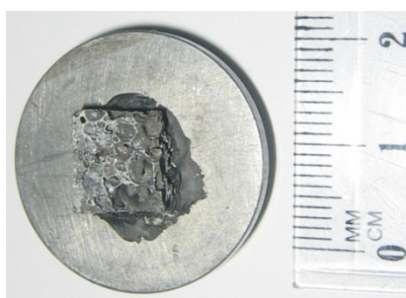


Figura 3.9: Amostra de espuma de Alumínio preparada para o MEV.

3.2.6. Técnicas de Difracção de Raios-X

A cristalografia de raios-X é uma técnica que consiste em fazer passar um feixe de raios-X através de um cristal da substância a estudar. O feixe difunde-se em várias direcções devido à simetria do agrupamento de átomos e, por difracção, dá lugar a um padrão de intensidades que pode interpretar-se segundo a distribuição dos átomos no cristal, aplicando a lei de Bragg [33]. Esta técnica utiliza-se na identificação de estruturas cristalinas dos materiais.

A identificação dos compostos químicos formados no metal de base das paredes celulares das espumas AlSi7 submetidas a diferentes condições ambientais, foi realizada com o auxílio de um difractómetro de raios-X Philips X'Pert MPD (Figura 3.10).

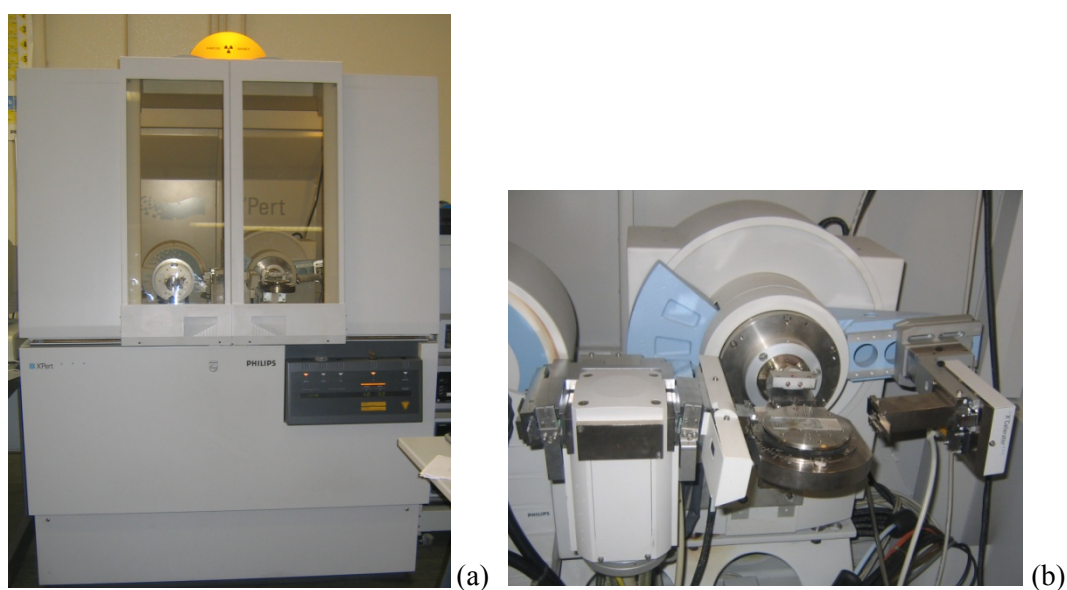


Figura 3.10: (a) Difractómetro de raio-X; (b) Local no difractómetro onde se testa uma amostra.

A preparação das amostras para observar em difracção de raios-X foi semelhante à preparação do MEV, sendo a dimensão igual ($10 \times 10 \times 2$ [mm³]) (Figura 3.11).

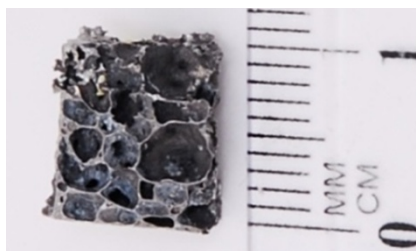


Figura 3.11: Amostra de espuma de Alumínio para a análise à difracção de raios-X.

Capítulo 4 – Resultados e Discussão

4.1. Introdução

Como foi referido, as espumas de Alumínio e suas ligas, obtidas por pulverotecnologia, apresentam, regra geral, baixa densidade, boa capacidade de absorção de energia e boa capacidade de amortecimento de som e vibrações. Por estas razões, estes materiais têm um grande potencial no sector dos transportes, nomeadamente como estruturas ultra-leves, de absorção de energia e de amortecimento sonoro.

As propriedades destes materiais derivam da combinação da estrutura porosa com a natureza metálica do material de base. Assim, é importante efectuar uma boa caracterização das espumas a nível de densidade e de estrutura celular de forma a correlacionar com as suas propriedades.

A capacidade de absorção/dissipação de energia é uma das características mais importante para aplicações relacionadas com segurança (em caso de impacto), com dissipação de calor e amortecimento de vibrações. Esta característica pode ser inferida experimentalmente através da realização de ensaios mecânicos de compressão.

O principal objectivo deste trabalho foi estudar a influência das condições ambientais nas propriedades de espumas de liga AlSi7, obtidas por pulverotecnologia. Para tal, foram realizados testes ambientais que consistiam em colocar amostras de espumas no interior de uma câmara climática que permitisse o controlo de parâmetros como a percentagem humidade relativa, a temperatura e o tempo. A avaliação das propriedades mecânicas das espumas submetidas às diferentes condições ambientais foi efectuada através da realização de ensaios de compressão à temperatura ambiente e a uma velocidade de carregamento constante e igual a 1 mm/min, usando uma máquina de ensaios mecânicos universal. Para cada condição ambiental, realizou-se a caracterização física, estrutural e mecânica das amostras de espuma, conforme a metodologia descrita no Capítulo 3.

De seguida, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a execução experimental.

4.2. Densidade

A densidade é um dos parâmetros que mais influência as propriedades finais das espumas metálicas. As espumas de Alumínio de liga AlSi7 em estudo apresentam uma densidade média de $0,55 \text{ g/cm}^3$. Para verificar o efeito das condições ambientais na densidade das espumas, efectuou-se um controlo da densidade antes e após os testes de ambientais. Na Tabela 4.1 e na Figura 4.1 são apresentados os valores médios da densidade das amostras, antes e após serem submetidas a cada condição ambiental. O número de amostras usado para cada condição ambiental foi três (3).

Tabela 4.1: Densidade média das amostras de espumas da liga AlSi7.

Teste Ambiental	Condições ambientais			Densidade média [g/cm³]	
	Temperatura [°C]	Humidade Relativa [%]	Tempo [h]	Antes do teste ambiental	Após o teste ambiental
Ref.	20	50	-	0,611	-
A	-20	60	24	0,478	0,477
B			48	0,509	0,508
C	0		24	0,517	0,523
D			48	0,543	0,545
E	40		24	0,557	0,557
F			48	0,592	0,586
G	100	0	24	0,561	0,558
H			48	0,545	0,541
I			120	0,628	0,630
J	160		24	0,545	0,543
K			48	0,553	0,553
L			120	0,572	0,570

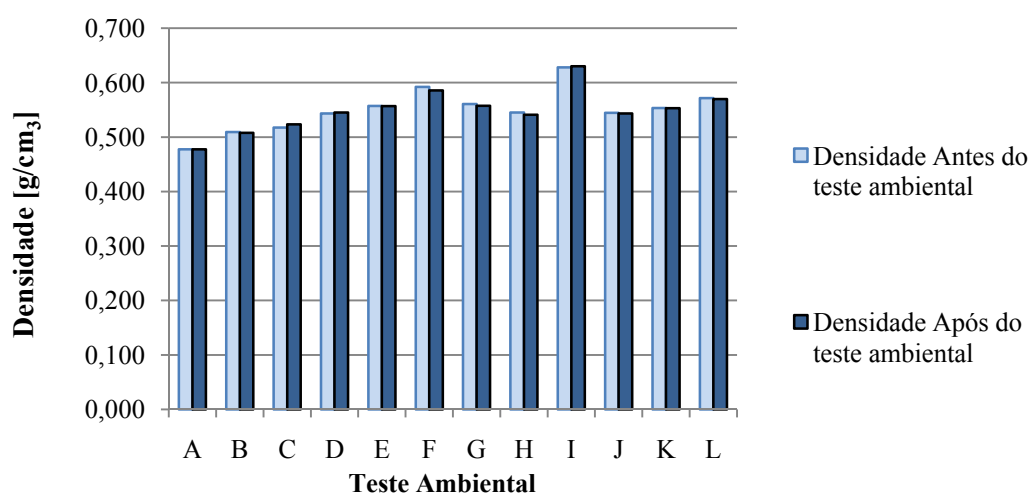


Figura 4.1: Densidade média das amostras antes e após o teste ambiental.

Os resultados experimentais mostram que não existem variações significativas dos valores da densidade média das espumas antes e após estas serem submetidas às diferentes condições ambientais (Tabela 4.1 e Figura 4.1). Tal facto pode ser devido à protecção conferida pela película densa externa existente nestas amostras, que evita a transferência de água presente no meio ambiente para o seu interior e vice-versa.

As espumas metálicas, obtidas pelo processo de pulverotecnologia, são sólidos com uma estrutura interna altamente porosa e apresentam uma película externa densa (Figura 3.1). A presença desta película influencia as suas propriedades, originando por exemplo o aumento das propriedades mecânicas [4].

O facto de a densidade não se alterar pode ainda dever-se às próprias características do material de base, o Alumínio. O Alumínio é um material que sofre corrosão quando exposto ao ar, devido ao óxido que se forma espontaneamente na superfície. A camada fina de óxido formada oferece uma baixa resistência para a difusão de oxigénio, não alterando assim a composição do material significativamente, e por conseguinte, não afectando a densidade do material significativamente.

No entanto, os resultados mostram a existência de algumas oscilações nos valores que pode ser atribuído à transferência de água entre a amostra e o meio ambiente.

4.3. Estrutura Celular

A caracterização estrutural das espumas de liga de Alumínio foi efectuada usando técnicas de análise de imagem, de microscopia e de difracção de raio-X. Foi também observada uma amostra de material precursor com o objectivo de compreender as suas características estruturais.

A Figura 4.2 apresenta a microestrutura do material precursor, obtido por extrusão a quente de uma mistura de pós de Alumínio (Al), de Silício (Si) e de hidreto de Titânio (TiH_2 , como agente expensor). Como se pode visualizar, a distribuição das partículas de TiH_2 e de Si no interior da matriz metálica de Alumínio não é uniforme.

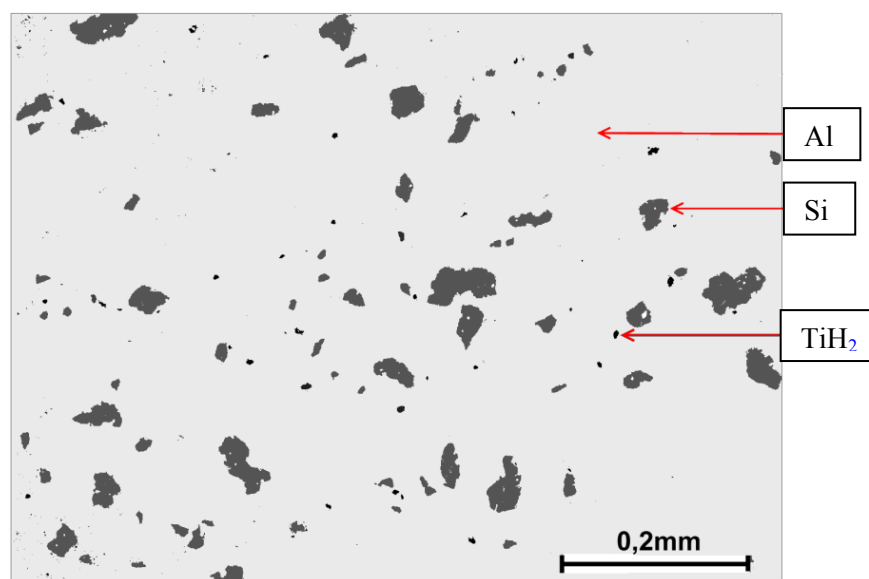


Figura 4.2: Visualização do material precursor, em que as partículas de Silício e de TiH_2 encontram-se distribuídas no interior da matriz de Alumínio.

Como foi mencionado anteriormente, estas espumas apresentam uma película densa externa que se deve ao próprio processo de fabrico, as quais são obtidas colocando o material precursor no interior de um molde fechado a temperaturas acima da temperatura de fusão do metal de base [2]. Para o fabrico das espumas estudadas neste trabalho foi usado um molde de 30mm de diâmetro e de 30 mm de altura.

As espumas de liga AlSi7 estudadas apresentam um aspecto idêntico ao exemplo visualizado na Figura 4.3.

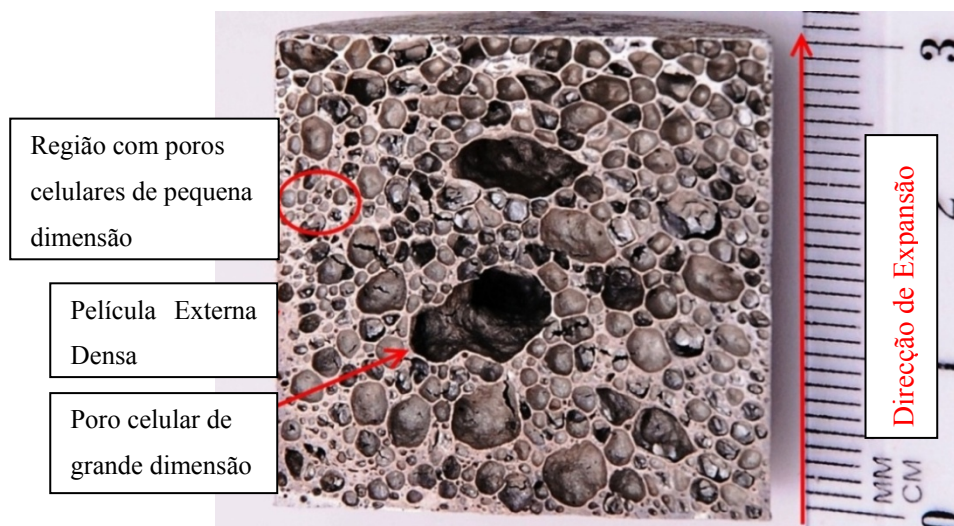


Figura 4.3: Imagem da secção de uma amostra de espuma de Alumínio.

Com base nas observações efectuadas sobre as diferentes amostras de espuma de liga AlSi7, pode concluir-se que as espumas obtidas por pulverotecnologia apresentam as seguintes características (Figura 4.3):

- Uma estrutura celular com uma distribuição alargada de dimensão de poros e de formas irregulares;
- A presença de uma película externa densa em volta de cada amostra;
- Diferentes tipos de geometria dos poros (poliédrica, esférica, *etc.*);
- A presença de fendas nas paredes dos poros celulares.

A estrutura celular com uma distribuição alargada de tamanhos de poros e de formas irregulares é devido ao crescimento de espumas de ligas de Alumínio produzidas por pulverotecnologia não ser isotrópico nem uniforme [2, 10]. A anisotropia ocorre quando os poros se formam, devido aos aglomerados locais de partículas de TiH_2 (Figura 4.2) ou mesmo aos defeitos estruturais que podem facilitar a formação de poros [10]. Por esse motivo, estas espumas apresentam uma distribuição alargada de tamanhos de poros com diferentes formas.

Neste trabalho foi efectuada uma caracterização estrutural das espumas em que foram observados e/ou quantificados os seguintes parâmetros estruturais:

- Poros: número, distribuição de dimensão, dimensão média, forma e geometria (por exemplo geometria cilíndrica e geometria poliédrica);
- Paredes celulares: espessura, intersecções;
- Película externa: espessura;
- Presença de defeitos nas paredes celulares.

A medição da dimensão dos poros, da espessura das paredes celulares e da película externa densa foi realizada com o auxílio de um *software* acoplado ao microscópio óptico que permitia efectuar medições consoante a escala utilizada. Para tal, foram usadas 13 amostras em que a área de observação de cada uma delas foi de 30×30 [mm²]. Na Figura 4.4 apresentam-se dois exemplos de imagens obtidas através do microscópio óptico com o auxílio do *software* para a medição de tamanho de poros, das paredes celulares e da película externa.

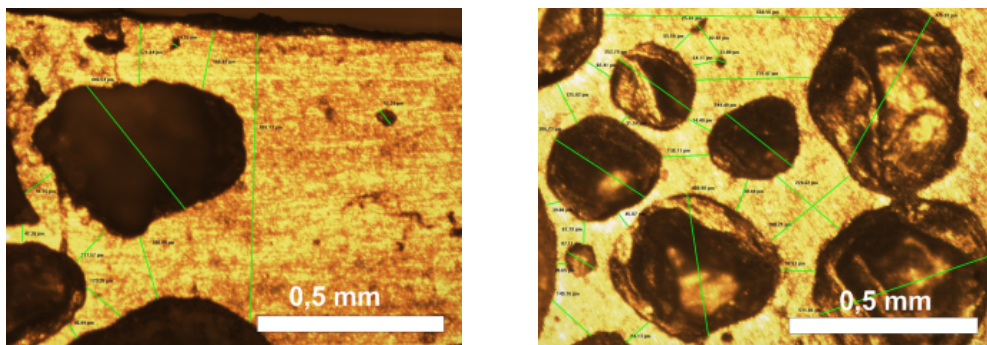


Figura 4.4: Medições do diâmetro de poros celulares e de espessura de paredes celulares.

Os resultados obtidos da espessura média das paredes celulares, da espessura média da película externa densa, do diâmetro médio de poros e do número médio de poros são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Características estruturais das espumas de Alumínio (13 amostras).

Parede Celular	Película Externa	Poros	
Espessura média [μm]	Espessura média [μm]	Diâmetro médio [μm]	Número médio
178,34	381,85	218,47	495

A distribuição do tamanho médio de poros foi igualmente determinada através de técnicas de análise de imagem, em que os resultados são apresentados resumidamente na Tabela 4.3 e na Figura 4.5.

Tabela 4.3: Distribuição da dimensão média de poros (13 amostras)

Poros	Diâmetro médio	< 2 mm	2 - 4 mm	4 - 6 mm	6 - 8 mm	> 8 mm
	Número médio	420	62	10	2	1

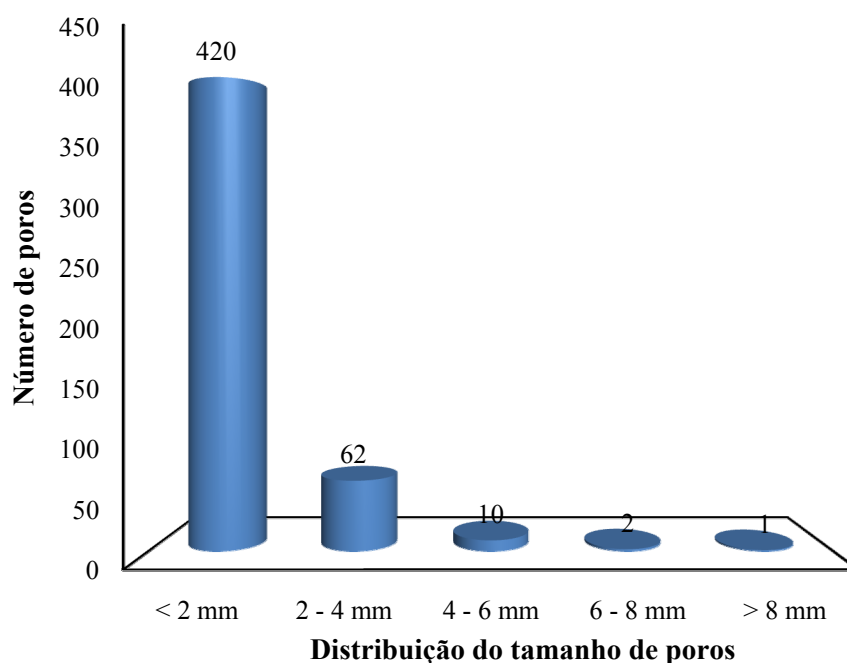


Figura 4.5: Distribuição dimensional de poros (13 amostras).

Os resultados obtidos confirmam uma distribuição de tamanhos de poros observada nas amostras, e verifica-se um intervalo alargado de tamanhos de poros com uma distribuição irregular. As amostras apresentam uma elevada percentagem de poros celulares com diâmetro inferior a 2 mm, seguido de poros no intervalo de 2 - 4 mm de diâmetro. Observou-se ainda que estes poros de pequena dimensão estão localizados maioritariamente junto à película externa (Figura 4.8) e ainda nas paredes celulares (Figura 4.13).

A presença da película densa externa influencia grandemente as propriedades mecânicas destes materiais. Com o objectivo de observar se existia uma variação desta película densa externa neste tipo de espumas foi determinada a sua espessura em três zonas distintas das amostras (Figura 4.6): topo, lateral e base. Na Tabela 4.4 são apresentados resumidamente os resultados obtidos dos valores médios da espessura para as diferentes zonas. Nas Figuras 4.7 a 4.9 podem visualizar-se algumas imagens obtidas nas diferentes zonas.

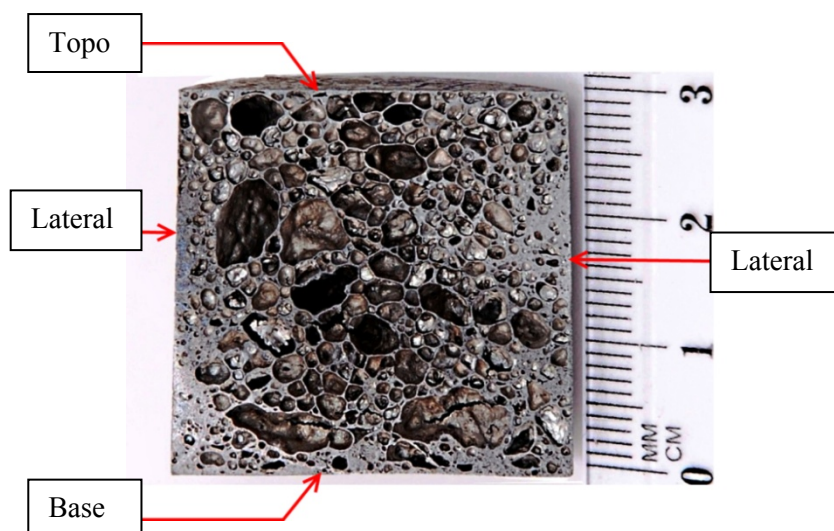


Figura 4.6: Película externa densa no topo, base e lateral numa amostra de espuma.

Tabela 4.4: Espessura média da película densa externa nas várias zonas: topo, lateral e base (13 amostras).

Espessura da película externa [μm]		
Topo	Lateral	Base
214,58	365,40	565,56

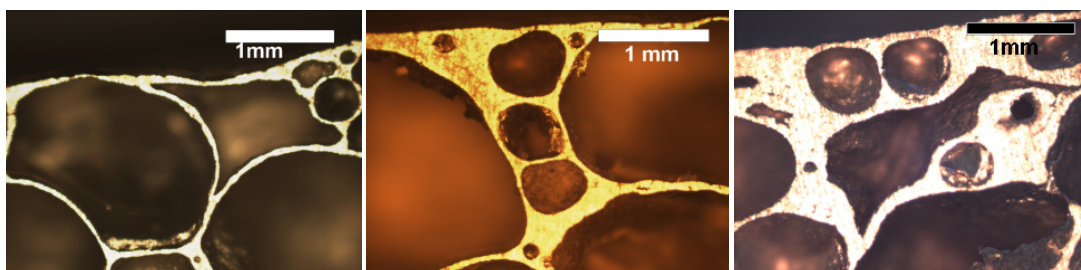


Figura 4.7: Visualização da espessura da película densa externa no topo de amostras.

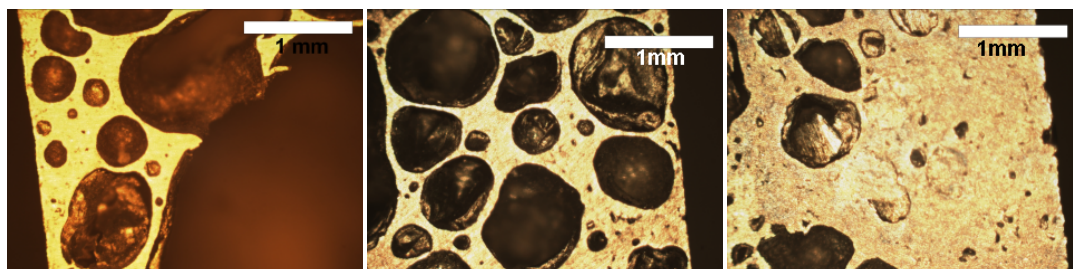


Figura 4.8: Visualização da espessura da película densa externa nas faces laterais de amostras.

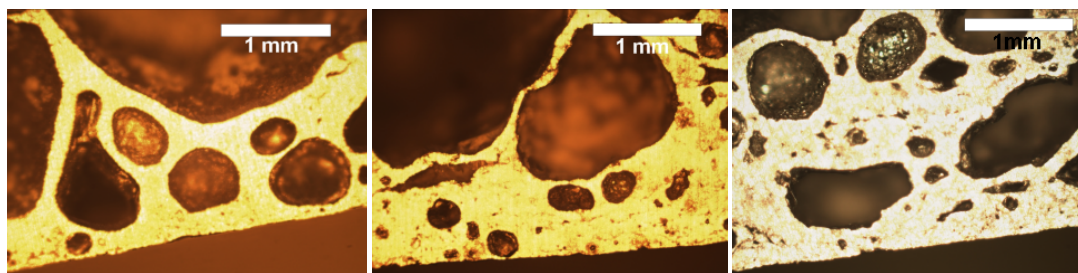


Figura 4.9: Visualização da espessura da película densa externa na base de amostras.

Os resultados mostram claramente que a película densa externa apresenta diferenças na espessura consoante a sua localização, sendo mais espessa na base das amostras. Tal facto é devido, aos fenómenos que ocorrem durante e após formação da espuma metálica. O processo de formação da espuma metálica no interior de um molde fechado a temperaturas superiores à temperatura de fusão é interrompido quando ocorre o preenchimento total da cavidade do molde, sendo imediatamente arrefecida até à temperatura ambiente, obtendo-se um sólido altamente poroso com uma película externa densa. Durante o arrefecimento da amostra a espuma tende a atingir o equilíbrio associado a um rearranjo da estrutura celular. Um dos mecanismos responsável por estas diferenças é o escoamento de líquido (metal líquido) através das paredes das células por gravidade para a parte inferior da amostra, designado por drenagem.

A observação efectuada às diferentes amostras permitiu concluir que a estrutura celular destas espumas apresenta poros de formas irregulares (Figura 4.10) essencialmente esférica e poliédrica.

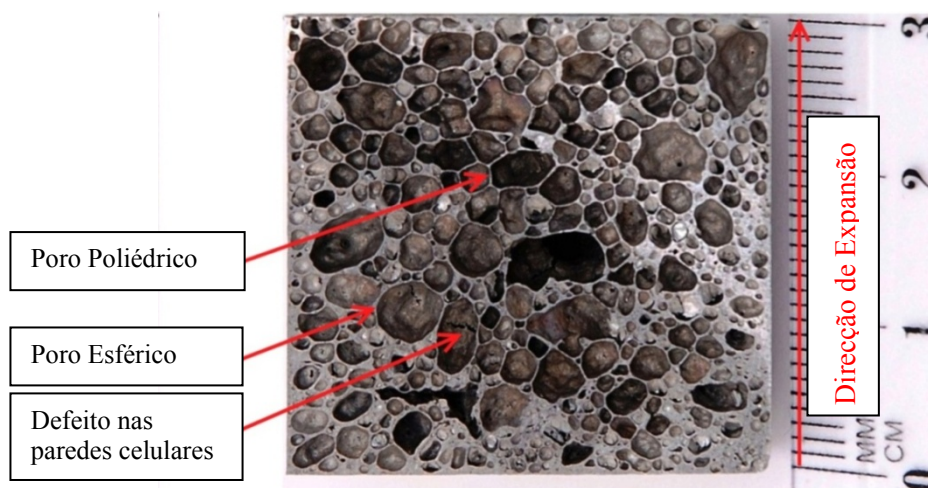


Figura 4.10: Secção de uma amostra de espuma de Alumínio em que se evidencia a morfologia dos poros celulares e presença de defeitos.

Das observações, notou-se ainda que os poros esféricos se encontravam maioritariamente localizados na base e nas zonas laterais das amostras, apresentando por vezes paredes celulares

espessas (Figura 4.11). Enquanto os poros poliédricos são observados principalmente no topo das amostras, apresentando geralmente paredes celulares finas (Figura 4.12).

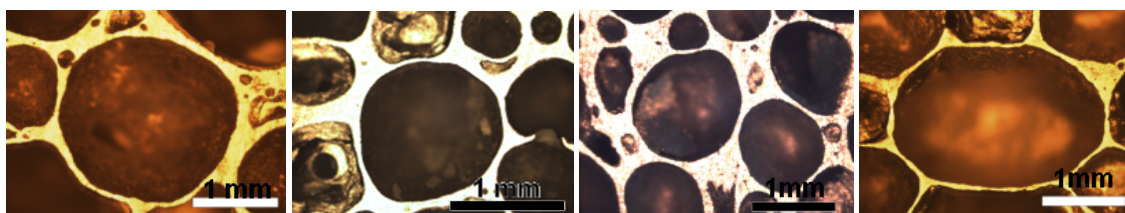


Figura 4.11: Visualização de poros de geometria esférica.

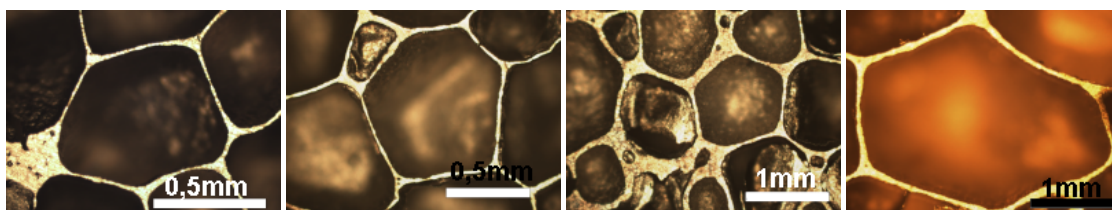


Figura 4.12: Visualização de poros de geometria poliédrica.

Observou-se igualmente que as paredes dos poros celulares apresentam diferentes espessuras, e que em algumas delas estas contêm mesmo poros de pequena dimensão (Figura 4.13).

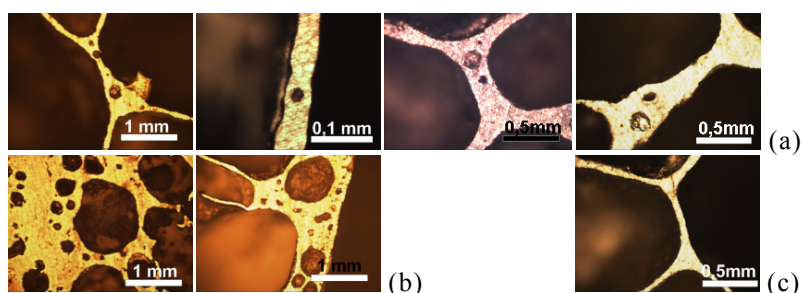


Figura 4.13: Visualização da presença de poros celulares de pequena dimensão (a) em paredes finas, (b) em paredes espessas e (c) uma parede celular sem poros.

Também se observaram as intersecções das paredes celulares dos poros ou junções de Plateau, com diferentes morfologias (Figura 4.14). Algumas intersecções contêm poros de pequena dimensão e o número de lamelas não é constante, observando-se intersecções de três ou de quatro paredes.

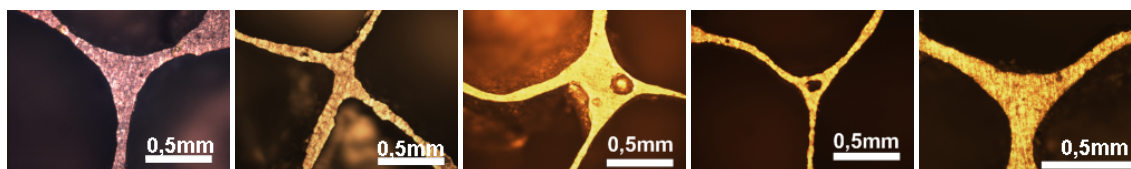


Figura 4.14: Visualização de junções de Plateau.

Nas Figuras 4.15 a 4.17 são apresentados os resultados das observações efectuadas ao tipo de poros existente nas diferentes zonas da película externa densa – topo, lateral e base (Figura 4.6).

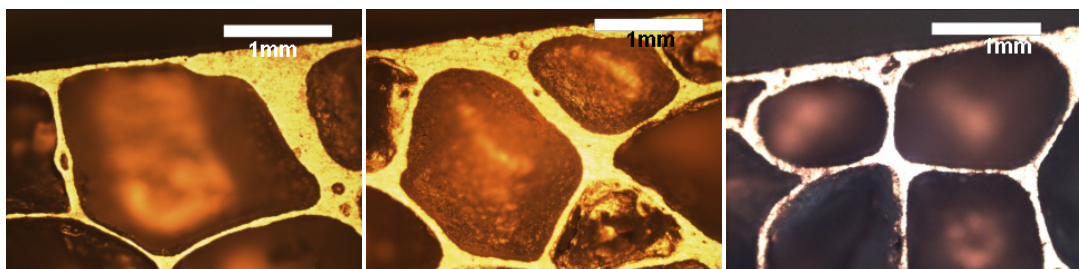


Figura 4.15: Visualização de poros no topo da amostra.

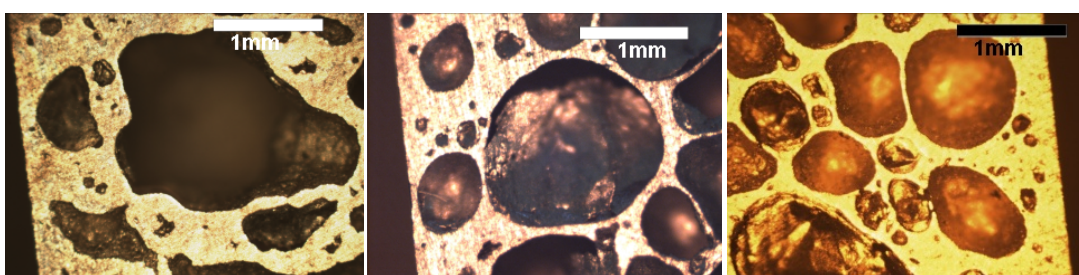


Figura 4.16: Visualização de poros na lateral da amostra.

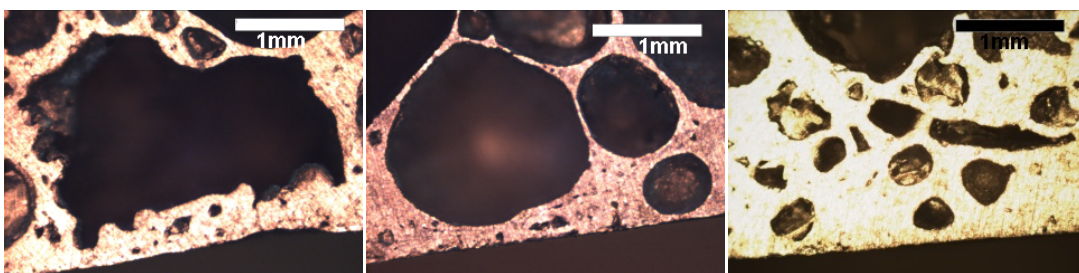


Figura 4.17: Visualização de poros na base da amostra.

Todas as observações estruturais observadas nestas espumas, nomeadamente a anisotropia, a morfologia dos poros celulares e a localização destes devem-se aos mecanismos físico-químicos associados ao processo de formação destas espumas através deste processo.

As amostras de espuma de Alumínio observadas mostram a existência de anisotropia e diferenças na morfologia e localização dos poros. Na formação da espuma ocorreram mecanismos que provocaram essa heterogeneidade no material.

Durante o crescimento da espuma, no processo de expansão, as bolhas iniciais alongadas crescem tornando-se esféricas. A quantidade de metal inicial na interface entre as bolhas no início é elevada. Contudo, após algum tempo ocorre a drenagem do metal fundido das interfaces entre as bolhas, devido a efeitos de gravidade e de pressão capilar. As bolhas normalmente observadas têm

geometria poliédrica e/ou esférica [2]. As células esféricas possuem filmes de líquidos espessos e são frequentemente observadas no início do estágio de crescimento da formação da espuma. Conforme o líquido drena, a espessura destes filmes diminui, diminuindo também a distância entre as bolhas de gás (células), as quais adquirem a geometria poliédrica. As bolhas de forma poliédrica estão separadas por filmes finos de líquido (faces), e por sua vez as faces dos poliedros são superfícies curvas, cuja intersecção forma linhas designadas por junções de Plateau.

A existência de poros de grandes dimensões e de formas irregulares deve-se a fenômenos de coalescência. A coalescência é o crescimento de algumas bolhas pelo desaparecimento de outras. A coalescência ocorre quando a lamela entre duas bolhas vizinhas se torna instável e rompe. A lamela comum desaparece e ocorre então a junção de duas bolhas. Bolhas de diferentes diâmetros têm necessariamente diferentes pressões internas. A pressão é proporcional ao inverso do raio da bolha, pelo que uma bolha pequena com uma elevada pressão pode desaparecer facilmente, transferindo o gás para uma bolha vizinha de maiores dimensões.

A presença de fendas nas paredes celulares das espumas de Alumínio foram também observadas, como se exemplifica nas Figuras 4.10 e 4.18. A presença de fendas em algumas paredes celulares pode dever-se ao arrefecimento brusco das amostras após a sua formação para temperaturas abaixo da temperatura de fusão, de forma a solidificar as mesmas [2].

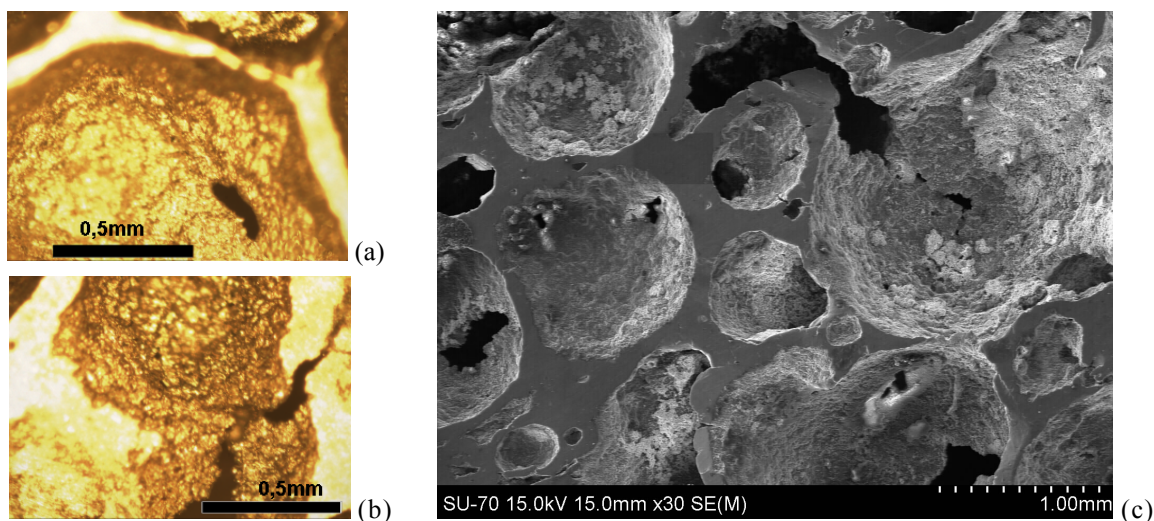


Figura 4.18: Presença de fendas nas paredes celulares: (a) e (b) imagens obtidas no microscópio óptico e (c) imagem obtida no MEV.

A Figura 4.19 apresenta a microestrutura e distribuição dos elementos químicos constituintes do material de base das espumas de liga AlSi7, salientando a distribuição do Silício na matriz metálica de Alumínio. As partículas angulares iniciais de Silício distribuídas no material precursor (Figura

4.2) dissolveram-se na matriz de Alumínio durante a formação da espuma dando origem à liga AlSi7, como se pode observar na Figura 4.19c.

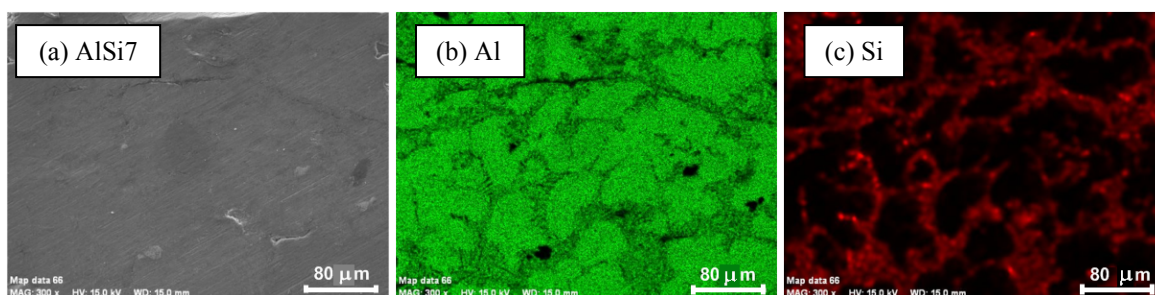


Figura 4.19: (a) Microestrutura das paredes celulares; (b) mapa de raios-X do Alumínio e (c) mapa de raios-X do Silício.

Por último, através de técnicas de difracção de raios-X, foram identificados os principais compostos químicos presentes nas paredes celulares das espumas para as temperaturas extremas (de -20°C e 160°C) e para a temperatura de referência (Tabela 4.5).

Tabela 4.5: Compostos químicos identificados numa amostra de referência e nas amostras expostas a temperaturas de -20 e 160°C e humidade relativa de 60 e 0%, respectivamente.

Condição ambiental		Compostos químicos			
Temperatura [°C]	Humidade relativa [%]				
- 20	60	Al	Si	TiH _{1,80}	Al(OH) ₃
20	50	Al	Si	TiH _{1,971}	Ti ₃ AlC
160	0	Al	Si	TiH _{1,971}	TiAl

Os resultados mostram que além do Alumínio (Al) e do Silício (Si) detectou-se a presença de hidretos intersticiais, TiH_x, em que o ‘x’ depende das condições ambientais. Este composto está relacionado com o agente expansor usado para o fabrico destas espumas – o dihidreto de Titânio (TiH₂). Sabe-se que a proporção entre átomos de Hidrogénio e de átomos de Titânio não é constante, podendo variar de TiH_x até TiH₂, dependendo das condições ambientais [2]. Observou-se também que para as temperaturas de 160 e 20°C existiu a formação de TiAl e Ti₃AlC, respectivamente. As ligas fundidas de Alumínio têm tendência de formar compostos intermetálicos que são partículas sólidas e dispersas na matriz de Alumínio. Estes podem contribuir para a alteração da resistência mecânica.

O Titânio é geralmente adicionado a ligas em pequenos teores (de 0,05 a 0,20%) como refinador de grão, tendo como consequência o aumento de resistência à tracção e a ductilidade, reduzindo porém a condutividade térmica [34].

Para temperaturas de -20°C detectou-se a formação de Al(OH)_3 que está relacionado provavelmente com o envelhecimento natural da camada superficial de óxido. O Alumínio forma um filme superficial de óxido de alumínio (Al_2O_3 , alumina) que cresce rapidamente quando exposto ao ar ou à água [26, 35].

4.4. Resistência à Compressão

A avaliação das propriedades mecânicas e do comportamento das espumas metálicas é bastante complexa, dado que dependem das propriedades decorrentes da estrutura celular (geometria, forma e espessura), das propriedades intrínsecas dos materiais constituintes, e no caso das espumas de estrutura fechada, do tipo de atmosfera aprisionada nas próprias células [2]. As propriedades destes materiais derivam da sua natureza metálica em combinação com a sua estrutura celular, que lhes confere excelente desempenho em certas aplicações, comparativamente com outros materiais.

Uma das potenciais aplicações das espumas metálicas é a sua utilização nas estruturas de absorção de energia, em que estão submetidas a esforços dinâmicos de tracção/compressão. A possibilidade de controlar o comportamento tensão–deformação através de uma selecção apropriada do material base, da morfologia (geometria celular) e da densidade relativa, faz das espumas metálicas materiais ideais para tais aplicações.

Neste trabalho, a avaliação das propriedades mecânicas foi realizada através da metodologia apresentada na Secção 3.2.2, em que se realizaram ensaios de compressão à temperatura ambiente, com uma velocidade de carregamento $v=1$ mm/min.

O estudo da influência das condições ambientais, nomeadamente, o efeito da temperatura, da percentagem de humidade relativa e do tempo na resistência à compressão foi efectuado através das diferenças das curvas globais força–deslocamento obtidas para as diferentes condições ambientais (vd. Tabela 3.1), bem como os pontos mais importantes das referidas curvas. Para cada condição ambiental foi obtida a curva média global das amostras ensaiadas.

As espumas de liga AlSi7 estudadas, em geral, apresentam o comportamento à compressão idêntico ao apresentado na Figura 4.20. A curva força–deslocamento resultante de um ensaio de compressão é similar às curvas de compressão de outras espumas metálicas [4, 36-39], e apresentam três regiões distintas: deformação elástica, cedência plástica e densificação. Estas regiões estão delimitadas por dois pontos, referenciados por ponto 1 e ponto 2. O ponto 1 é referente à força inicial do patamar F_1 (ou força de cedência) e respectivo deslocamento d_1 . O ponto 2 refere-se à força final do patamar F_2 e respectivo deslocamento d_2 . Na região de cedência plástica ou região de patamar destas espumas, a curva não é totalmente horizontal, apresentando um ligeiro declive. A força aumenta gradualmente à medida que o material se deforma. No entanto, existem outros tipos de espumas metálicas que a força se mantém constante durante um certo período de tempo ou com uma certa oscilação [4].

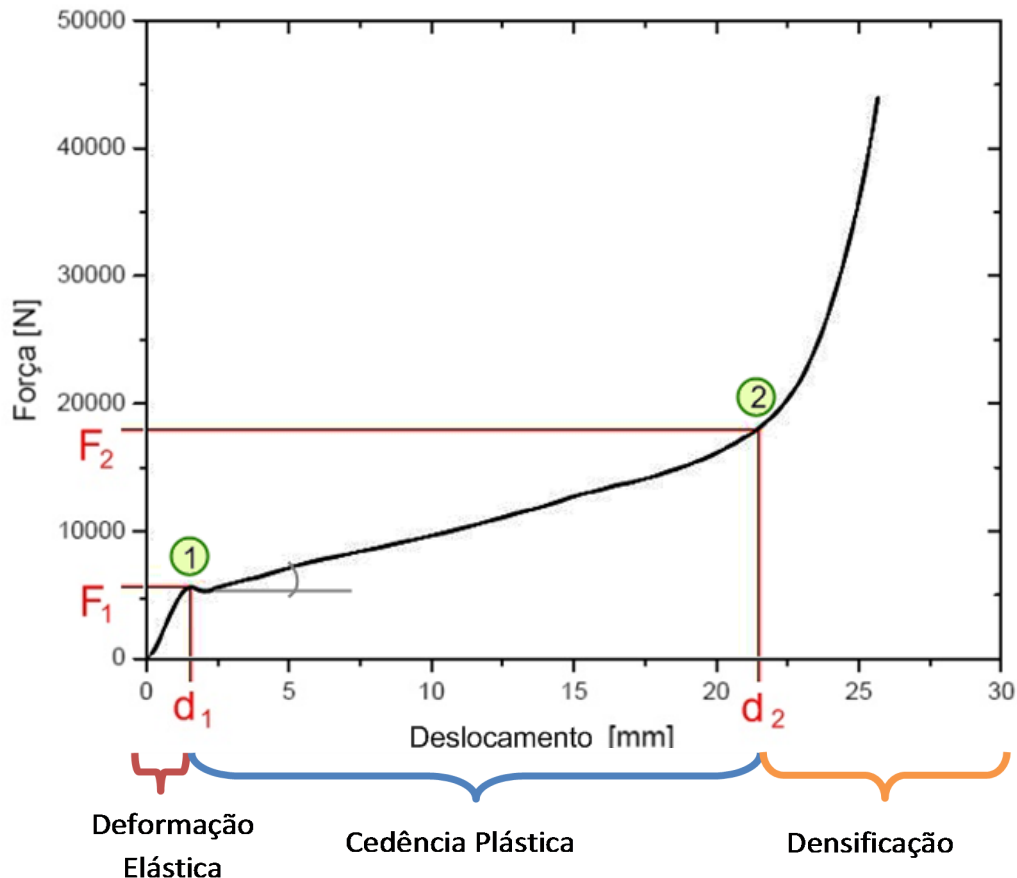


Figura 4.20: Curva força–deslocamento, com a indicação das principais regiões, delimitadas pela força inicial F_1 e força final F_2 do patamar, com os respectivos deslocamentos, d_1 e d_2 .

As forças inicial e final da região de cedência foram determinadas através da medição do ponto inicial e final da região de patamar para cada curva média global força–deslocamento referente a uma determinada condição ambiental.

A tensão de compressão para o ponto 1 e para o ponto 2 (σ_1 e σ_2 , respectivamente) foi calculada através do rácio entre a força e a área da secção da amostra (diâmetro $\approx 30\text{mm}$).

Nos parágrafos seguintes descrevem-se os aspectos mais importantes para caracterizar o comportamento mecânico das espumas de liga AlSi7 estudadas neste trabalho, com o exemplo da Figura 4.21. Nesta figura é apresentada a curva força–deslocamento de uma amostra de espuma AlSi7 obtida experimentalmente, em que se visualizam as três regiões mencionadas anteriormente: deformação elástica (OB), cedência plástica (BG) e densificação (GH).

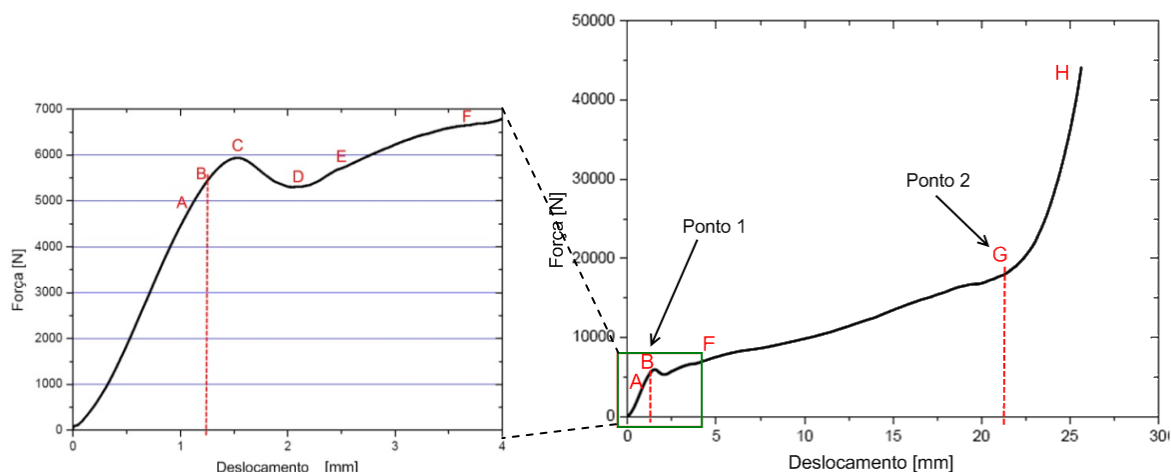


Figura 4.21: Diagrama de ensaio à compressão de uma amostra de espuma de Alumínio.

A deformação elástica (OB) apresenta uma elasticidade linear inicial (OA), até atingir a força elástica (ponto A) aproximadamente de 5 kN. A partir do ponto A, esta região apresenta uma elasticidade não-linear (AB), até atingir a força de cedência de 5,5 kN. A área correspondente ao comportamento elástico (OB) da espuma encontra-se limitada pelo deslocamento máximo $d=1,25$ mm e a força de compressão máxima $F=5,5$ kN.

A cedência ou patamar, BG, apresenta um comportamento plástico que aparenta, de início, um bloqueio à deformação subindo a carga de B (5,5 kN) para C (6 kN) reduzindo a resistência da estrutura celular rapidamente para 5,3 kN (D). A partir deste ponto de compressão do material (D), desencadeiam-se bandas de deformação progressivas na estrutura celular da espuma, com um comportamento de fluência, criando condições para o aumento de resistência mecânica da espuma. Esta deformação do material é acompanhada por um ligeiro aumento de força de compressão, até ao momento em que já ocorreu o colapso da maioria dos poros celulares e se atinge a região de densificação (ponto G). A região do patamar encontra-se limitada pelo deslocamento máximo ($d=22,5$ mm) e a força de compressão máxima $F=18$ kN.

Segue-se a densificação que corresponde à última parte da curva força–deslocamento (GH), onde acontece um aumento acentuado de força de compressão devido ao esmagamento dos poros celulares da espuma, tornando o material cada vez mais denso.

Os resultados experimentais obtidos dos ensaios de compressão mostram que as curvas médias globais força–deslocamento apresentam o mesmo andamento que o exemplo apresentado anteriormente, diferindo na forma da região inicial do patamar e do declive da curva na região do patamar (Figura 4.22). Estas diferenças podem dever-se à anisotropia do material, originando alguma discrepância entre as curvas obtidas força–deslocamento (Secção 4.3).

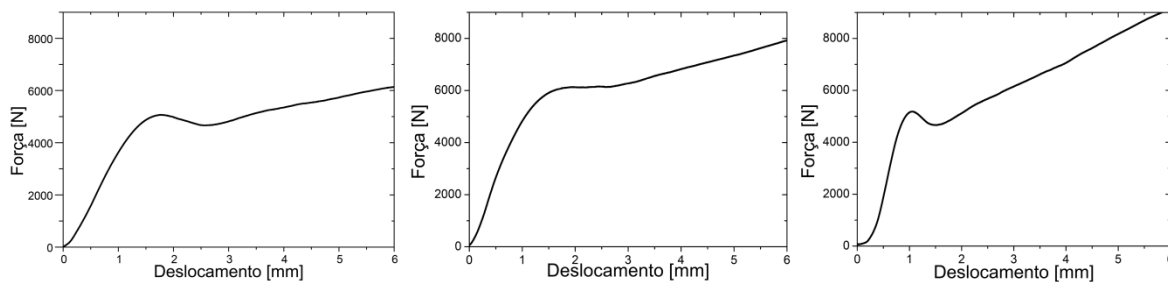


Figura 4.22: Formas das curvas força–deslocamento, onde se observam formas da região inicial do patamar.

4.4.1. Resultados preliminares

Para se compreender como as condições ambientais afectam o comportamento mecânico das espumas de Alumínio foi necessário estudar inicialmente amostras que não estiveram submetidas a nenhuma condição ambiental. Estas amostras de referência apenas estiveram expostas ao meio ambiente, com temperatura de 20°C e humidade relativa de aproximadamente 50%. Na Figura 4.23 observam-se as curvas resultantes dos ensaios de compressão das amostras de referência e a respectiva curva média. Os valores da força inicial F_1 e força final F_2 do patamar, com os respectivos deslocamentos, d_1 e d_2 , e as respectivas tensões calculadas para cada região, σ_1 e σ_2 , estão apresentados na Tabela 4.6. A determinação destes valores foi efectuada de acordo com a metodologia apresentada no exemplo da Figura 4.20.

Tabela 4.6: Valores das forças, deslocamentos e tensões para os pontos 1 e 2.

Condições Ambientais		Ponto 1			Ponto 2		
T [°C]	HR [%]	F_1 [kN]	σ_1 [MPa]	d_1 [mm]	F_2 [kN]	σ_2 [MPa]	d_2 [mm]
20	60	4,23	5,99	1,08	28,28	40,01	20,16

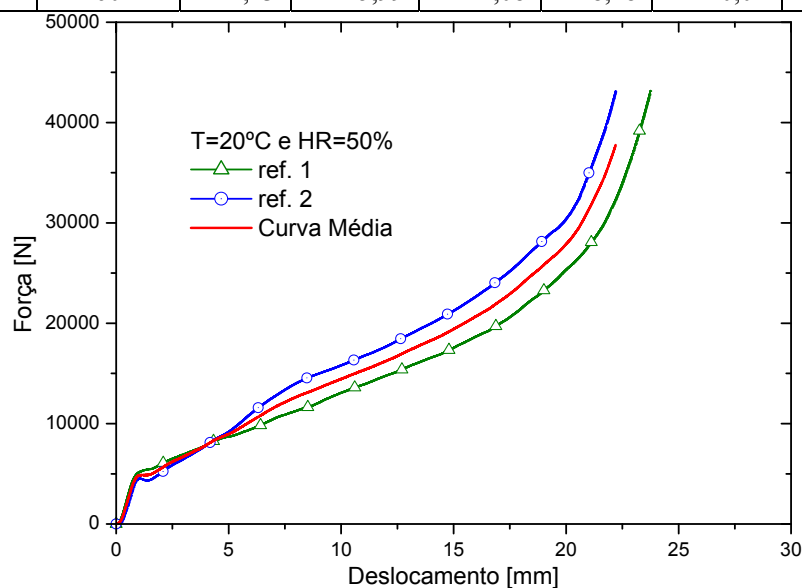


Figura 4.23: Curvas força–deslocamento obtidas para amostras de espuma de Alumínio que não foram submetidas às condições ambientais.

Como se pode visualizar, as curvas obtidas apresentam algumas diferenças significativas relativamente ao andamento referente às regiões de patamar e de densificação, apresentando, no entanto, valores mais próximos na região inicial.

A diferença das curvas está relacionada com a anisotropia do material. Durante a caracterização da estrutura celular das espumas, verificou-se que as amostras não têm a mesma estrutura celular, pelo que é natural que estas não apresentem o mesmo tipo de curvas, existindo mesmo desvio.

4.4.2. Temperatura

O estudo do efeito da temperatura na resistência mecânica foi realizado comparando as curvas médias força–deslocamento obtidas para amostras submetidas a diferentes temperaturas. O intervalo de temperatura usado foi de -20 a 160°C. Por dificuldades experimentais não foi possível garantir a mesma percentagem de humidade relativa para toda a gama de temperatura estudada. A percentagem de humidade relativa foi 60 e 0% para as temperaturas iguais ou inferiores a 40°C e iguais e superiores a 100°C, respectivamente (Tabela 3.1). Por esta razão, a comparação dos resultados experimentais foi efectuada apenas para as mesmas condições de percentagem de humidade relativa.

Para humidade relativa 60%, compararam-se as curvas médias força–deslocamento das amostras de espuma estudada, correspondentes às temperaturas de -20, de 0 e de 40°C, para tempos de 24 h (Figura 4.24) e 48 h (Figura 4.25), apresentando nas Tabelas 4.7 e 4.8 os valores dos pontos inicial (1) e final (2) do patamar, com as respectivas tensões.

Tabela 4.7: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para as temperaturas -20, 0 e 40°C e tempo de 24 h.

Condições ambientais			Ponto 1			Ponto 2		
T [°C]	HR [%]	t [h]	F_1 [kN]	σ_1 [MPa]	d_1 [mm]	F_2 [kN]	σ_2 [MPa]	d_2 [mm]
-20	60	24	4,38	6,2	1,67	12,91	18,26	21,43
0			5,23	7,39	1,67	16,19	22,91	19,51
40			5,62	7,95	1,56	18,93	26,78	21,94

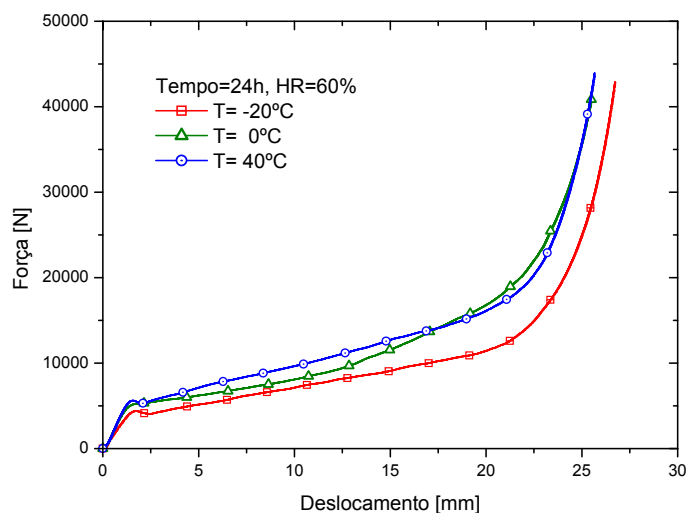


Figura 4.24: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes temperaturas ($t=24$ h e $HR=60\%$).

Tabela 4.8: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para as temperaturas -20 , 0 e 40°C e tempo de 48 h.

Condições ambientais			Ponto 1			Ponto 2		
T [$^{\circ}\text{C}$]	HR [%]	t [h]	F_1 [kN]	σ_1 [MPa]	d_1 [mm]	F_2 [kN]	σ_2 [MPa]	d_2 [mm]
-20	60	48	5,07	7,17	1,79	16,36	23,14	20,62
0			6,05	8,56	1,67	15,52	21,95	20,32
40			6,82	9,65	2,16	19,78	27,98	20,84

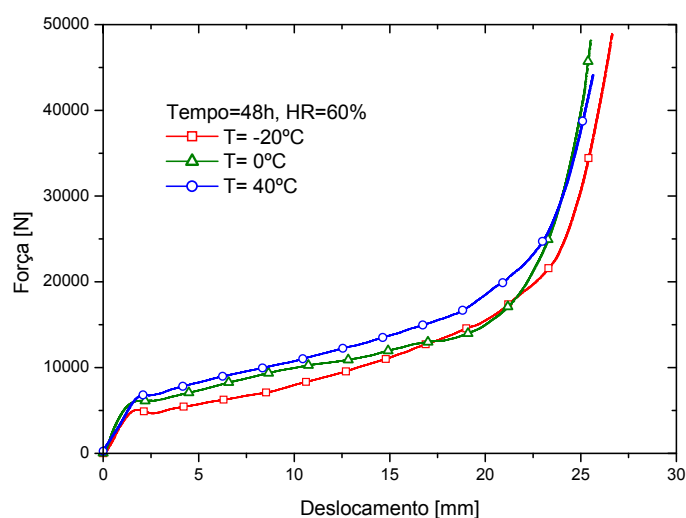


Figura 4.25: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes temperaturas ($t=48$ h e $HR=60\%$).

Pela análise dos gráficos anteriores, verifica-se que, independentemente do tempo de permanência a uma determinada temperatura, as curvas médias força–deslocamento referentes à temperatura de 40°C são as que apresentam maiores valores de resistência à compressão. As curvas referentes à temperatura de -20°C são as que têm menor resistência à compressão. Na leitura da tabela correspondente verifica-se o mesmo, que à medida que a temperatura aumenta, os valores dos

pontos 1 e 2 também aumentam, ou seja, as tensões inicial e final do patamar aumentam, indicando assim que a resistência mecânica também aumentou. Desta forma, os resultados mostram que existe uma tendência da resistência mecânica da espuma de Alumínio aumentar com a temperatura, para percentagens de humidade relativa de 60%

Para uma espuma de porosidade fechada arrefecida a temperaturas muito baixas (-20°C), esta pode originar o colapso das células devido ao gás interno presente nos poros celulares [3].

Para a percentagem de humidade relativa de 0%, são comparadas as curvas médias força–deslocamento das amostras, correspondentes às temperaturas mais elevadas de 100 e 160°C (Figuras 4.26 a 4.28), para diferentes tempos de envelhecimento de 24, 48 e 120 h, respectivamente. Nas Tabelas 4.9 a 4.11 apresentam-se os valores dos pontos inicial (1) e final (2) do patamar, com a respectiva tensão, para tempos de envelhecimento de 24, 48 e 120 h.

Tabela 4.9: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para as temperaturas 100 e 160°C e tempo de 24 h.

Condições ambientais			Ponto 1			Ponto 2		
T [°C]	HR [%]	t [h]	F_1 [kN]	σ_1 [MPa]	d_1 [mm]	F_2 [kN]	σ_2 [MPa]	d_2 [mm]
100	0	24	4,01	5,68	1,30	17,32	24,50	20,04
160			6,03	8,53	1,79	14,88	21,04	19,04

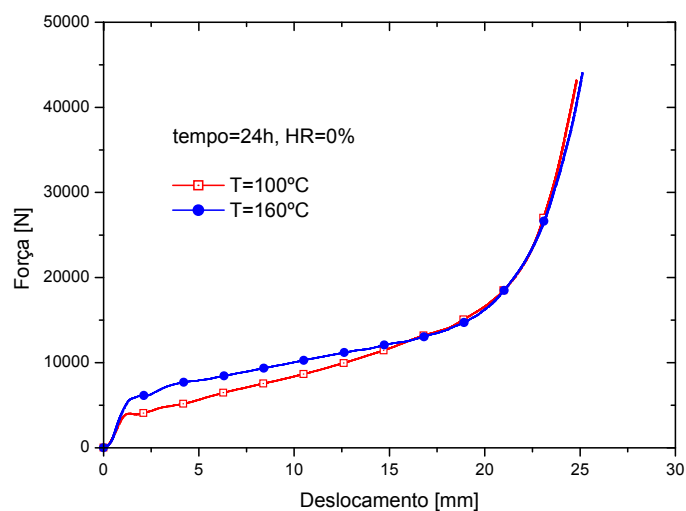


Figura 4.26: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes temperaturas (t=24 h e HR=0%).

Tabela 4.10: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para as temperaturas de 100 e 160°C e tempo de 48 h.

Condições ambientais			Ponto 1			Ponto 2		
T [°C]	HR [%]	t [h]	F_1 [kN]	σ_1 [MPa]	d_1 [mm]	F_2 [kN]	σ_2 [MPa]	d_2 [mm]
100	0	48	4,14	5,85	1,12	19,68	27,84	19,80
160			2,66	3,76	0,96	14,88	21,05	19,23

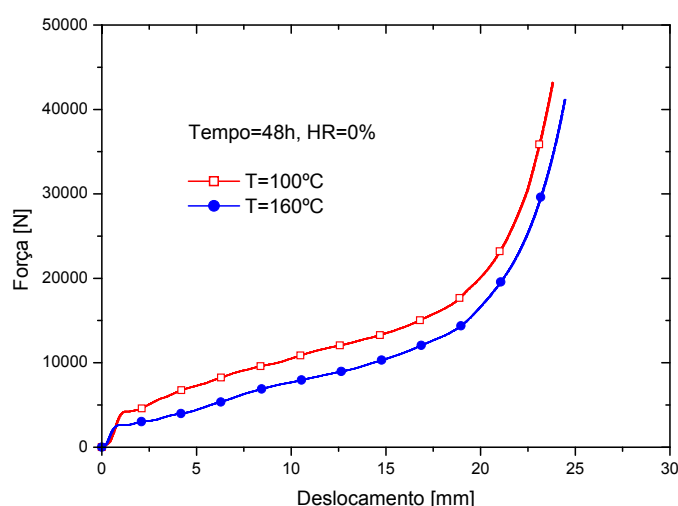


Figura 4.27: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes temperaturas ($t=48$ h e $HR=0\%$).

Tabela 4.11: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para as temperaturas de 100 e 160°C e tempo de 120 h.

Condições ambientais			Ponto 1			Ponto 2		
T [°C]	HR [%]	t [h]	F_1 [kN]	σ_1 [MPa]	d_1 [mm]	F_2 [kN]	σ_2 [MPa]	d_2 [mm]
100	0	120	5,14	7,27	0,97	22,99	32,53	19,69
160			5,18	7,33	1,07	21,56	30,50	19,15

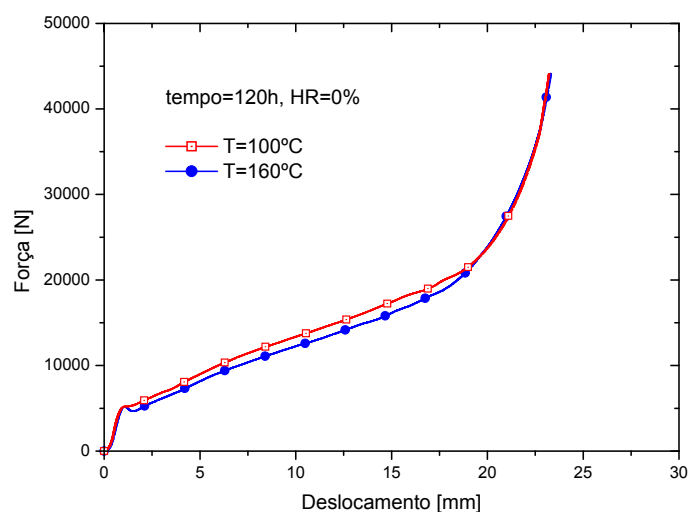


Figura 4.28: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes temperaturas ($t=120$ h e $HR=0\%$).

Os resultados mostraram que as curvas de compressão para a temperatura de 100°C apresentam valores superiores relativamente às curvas a 160°C, para os tempos de envelhecimento de 48 e 120h (Figura 4.27 e Figura 4.28). Para um tempo de envelhecimento de 24h, a tendência não é muito clara. No entanto, as curvas usadas para o cálculo da curva média apresentam grandes desvios. A causa desta diferença pode dever-se à discrepância de algumas curvas força-

deslocamento destas condições ambientais, devido à própria anisotropia do material (Secção 4.3). Analisando as Tabelas 4.9 a 4.11, verifica-se que as tensões iniciais e finais do patamar diminuem com o aumento da temperatura. Deste modo, para a percentagem de humidade relativa de 0% e gamas de temperatura entre 100 e 160°C, a resistência mecânica das espumas de Alumínio tem tendência de diminuir com o aumento da temperatura.

Em suma, as espumas de liga AlSi7 estudadas, apresentam dois tipos de comportamento mecânico quando submetidas a diferentes condições ambientais na gama de temperaturas estudada. Para temperaturas entre -20 e 40°C e humidade relativa 60%, a resistência mecânica aumenta com a temperatura. Contrariamente, para temperaturas entre 100 e 160°C existe a tendência de resistência mecânica diminuir com o aumento de temperatura.

As diferenças no comportamento mecânico destas gamas de temperatura podem dever-se aos seguintes factores:

- (i) A presença de diferentes compostos químicos presentes no metal de base (AlSi7) constituinte das paredes celulares das espumas consoante a condição ambiental. Por exemplo, para as temperaturas de -20, 20 e 160°C foi identificado $\text{Al}(\text{OH})_3$, Ti_3AlC e TiAl , respectivamente (Tabela 4.5).
- (ii) As velocidades usadas para atingir a temperatura pretendida em cada teste ambiental foram 4,5 e 1°C/min, para as gamas de temperatura de 100 a 160°C e -20 a 40°C, respectivamente.
- (iii) O não controlo da velocidade do ciclo térmico da amostra após estar submetida a um determinado teste ambiental, desde a temperatura do referido teste até à temperatura ambiente, que pode possibilitar o choque térmico, como no caso da temperatura de 160°C. O procedimento de remoção das amostras da temperatura de cada teste ambiental consistiu em retirá-las da câmara climática, sendo expostas ao ar e deixadas a estabilizar até atingir a temperatura ambiente (Secção 3.2.1).
- (iv) A presença de Hidrogénio aprisionado no interior dos poros celulares da espuma pode originar diferentes pressões internas nos poros celulares e, consequentemente, alterar os valores da resistência mecânica ou mesmo contribuir para o colapso das células [3].

4.4.3. Tempo

O estudo do efeito do tempo na resistência mecânica foi realizado comparando as curvas médias força–deslocamento obtidas para amostras submetidas a diferentes temperaturas. O intervalo de tempo usado foi de 24 a 120 h. De igual modo, o estudo do efeito do tempo foi realizado por comparação dos resultados experimentais para as mesmas condições de humidade relativa. A humidade relativa foi 60 e 0% para as temperaturas de -20, 0 e 40°C e para as temperaturas de 100 e 160°C, respectivamente.

Para a humidade relativa de 60%, compararam-se as curvas médias força–deslocamento, correspondentes aos tempos de 24 e 48 h, para uma mesma temperatura. Os resultados desta análise podem ser observados nas Figuras 4.29 a 4.31 para as temperaturas de -20, 0 e 40°C, respectivamente, e nas Tabelas 4.12 a 4.14.

Tabela 4.12: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para os tempos de 24 e 48 h, para a temperatura de -20°C.

Condições ambientais			Ponto 1			Ponto 2		
T [°C]	HR [%]	t [h]	F_1 [kN]	σ_1 [MPa]	d_1 [mm]	F_2 [kN]	σ_2 [MPa]	d_2 [mm]
-20	60	24	4,38	6,20	1,67	12,91	18,26	21,43
		48	5,07	7,17	1,79	16,36	23,14	20,62

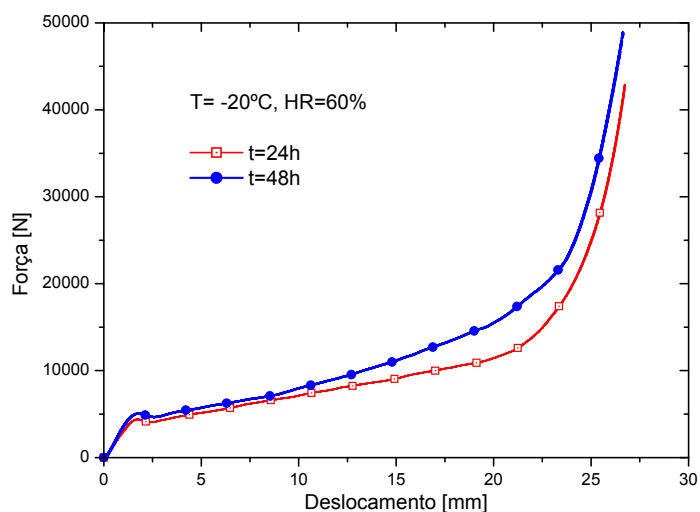


Figura 4.29: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes tempos (T=-20°C e HR=60%).

Tabela 4.13: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para os tempos de 24 e 48 h, para a temperatura de 0°C.

Condições ambientais			Ponto 1			Ponto 2		
T [°C]	HR [%]	t [h]	F_1 [kN]	σ_1 [MPa]	d_1 [mm]	F_2 [kN]	σ_2 [MPa]	d_2 [mm]
0	60	24	5,23	7,39	1,67	16,19	22,91	19,51
		48	6,05	8,56	1,67	15,52	21,95	20,32

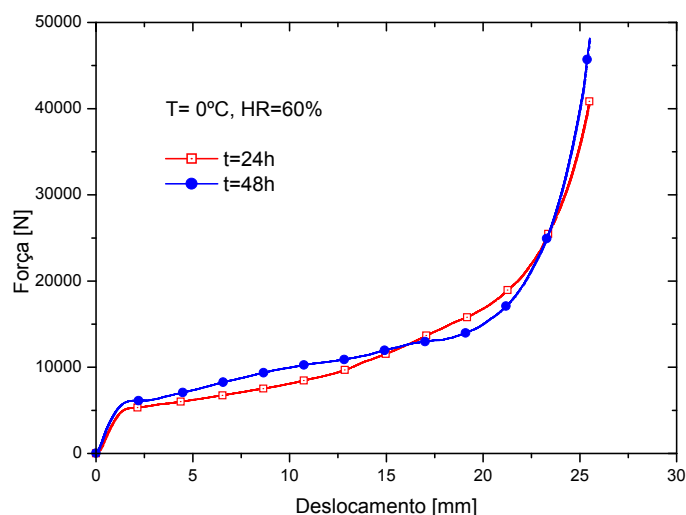


Figura 4.30: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes tempos ($T=0^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR}=60\%$).

Tabela 4.14: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para os tempos de 24 e 48 h, para a temperatura de 40°C .

Condições ambientais			Ponto 1			Ponto 2		
T [$^{\circ}\text{C}$]	HR [%]	t [h]	F_1 [kN]	σ_1 [MPa]	d_1 [mm]	F_2 [kN]	σ_2 [MPa]	d_2 [mm]
40	60	24	5,62	7,95	1,56	18,93	26,78	21,94
		48	6,82	9,65	2,16	19,78	27,98	20,84

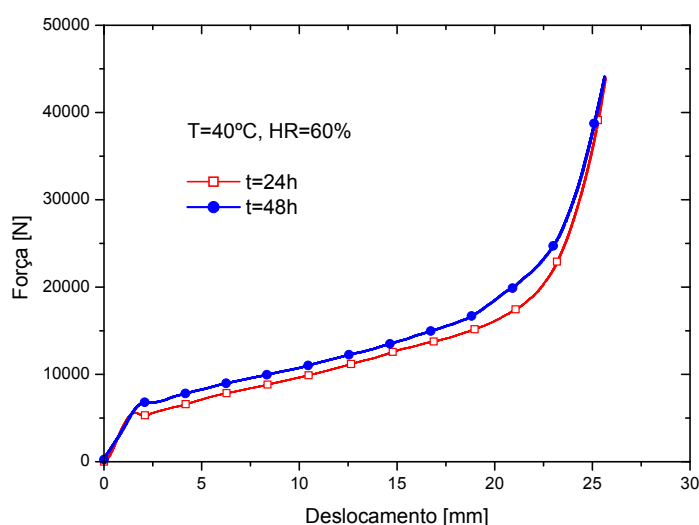


Figura 4.31: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes tempos ($T=40^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR}=60\%$).

Dos resultados obtidos, observa-se que independentemente da temperatura, o aumento do tempo de exposição tende a aumentar a resistência mecânica da espuma, visto que as curvas de compressão para tempos de 48 h são superiores às correspondentes a tempos de permanência mais baixos. No caso da temperatura de 0°C , verificou-se ainda que à medida que o tempo aumenta a região do patamar também aumenta em termos de deslocamento (Tabela 4.13), o que se traduz num aumento da resistência mecânica do material.

Da mesma forma, para uma humidade relativa de 0% e para as temperaturas mais elevadas de 100 e 160°C comparam-se as curvas resultantes dos testes de compressão para os diferentes tempos de envelhecimento (24, 48 e 120 h). Os resultados das Figuras 4.32 e 4.33 mostram como o tempo influencia a resistência mecânica do material para as temperaturas de 100 e 160°C, respectivamente. Nas Tabelas 4.15 e 4.16 são apresentados os valores dos pontos inicial (1) e final (2) do patamar, com a respectiva tensão, para tempos de envelhecimento de 24, 48 e 120 h, respectivamente.

Tabela 4.15: Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para os tempos de 24, 48 e 120 h, para a temperatura de 100°C.

Condições ambientais			Ponto 1			Ponto 2		
T [°C]	HR [%]	t [h]	F_1 [kN]	σ_1 [MPa]	d_1 [mm]	F_2 [kN]	σ_2 [MPa]	d_2 [mm]
100	0	24	4,01	5,68	1,30	17,32	24,50	20,04
		48	4,14	5,85	1,12	19,68	27,84	19,80
		120	5,14	7,27	0,97	22,99	32,53	19,69

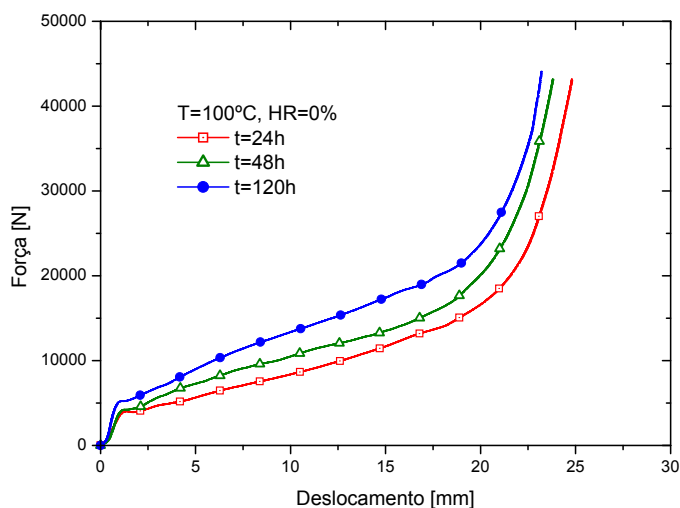


Figura 4.32: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes tempos (T=100°C e HR=0%).

Tabela 4.16 Valores médios da força, tensão e deslocamento para o início e fim da região de patamar para os tempos de 24, 48 e 120 h, para a temperatura de 160°C.

Condições ambientais			Ponto 1			Ponto 2		
T [°C]	HR [%]	t [h]	F_1 [kN]	σ_1 [MPa]	d_1 [mm]	F_2 [kN]	σ_2 [MPa]	d_2 [mm]
160	0	24	6,03	8,53	1,79	14,88	21,04	19,04
		48	2,66	3,76	0,96	14,88	21,05	19,23
		120	5,18	7,33	1,07	21,56	30,50	19,15

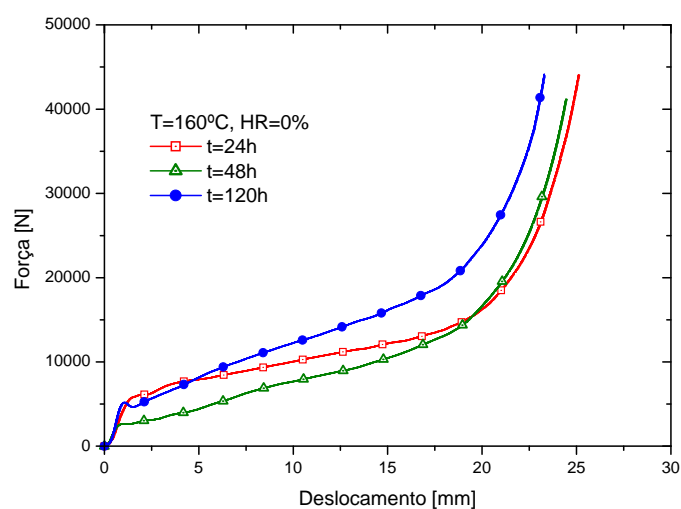


Figura 4.33: Curvas médias força–deslocamento de amostras submetidas a diferentes tempos ($T=160^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR}=0\%$).

Na análise dos gráficos força–deslocamento, observa-se que a resistência mecânica é maior para o maior tempo de envelhecimento (120 h), para a temperatura de 100°C . Na temperatura de 160°C , verifica-se a mesma tendência mas de uma forma não tão clara, que é devido ao desvio dos resultados das amostras. Analisando as respectivas tabelas (Tabelas 4.15 e 4.16) verifica-se que à medida que o tempo aumenta a resistência mecânica aumenta e a região de patamar diminui em termos de comprimento. Deste modo, verifica-se que à medida que o tempo de exposição aumenta, a resistência mecânica da espuma tende a aumentar.

4.4.4. Humidade Relativa

O estudo do efeito da humidade relativa nas espumas de Alumínio foi realizado submetendo as amostras em ambientes com duas percentagens de humidade relativa distintas:

- i) $\text{HR}=60\%$, $-20 < T < 40 [^{\circ}\text{C}]$;
- ii) $\text{HR}=0\%$, $100 < T < 160 [^{\circ}\text{C}]$.

Isto deveu-se ao facto do equipamento usado para submeter as amostras a diferentes condições ambientais não permitir um controlo eficaz da percentagem da humidade relativa.

Os resultados apresentam-se resumidamente na Tabela 4.17 e nas Figuras 4.34 e 4.35. A tabela indica os pontos mais importantes das curvas força–deslocamento, nomeadamente os valores obtidos da força, do deslocamento e da tensão, para os pontos inicial e final do patamar para cada condição ambiental. Na tabela, indica-se ainda a variação do deslocamento Δd na região de patamar e o declive do patamar.

Tabela 4.17: Força, tensão e deslocamento inicial e final da região do patamar para as condições ambientais.

Condições ambientais			Força [kN]		Tensão [MPa]		Deslocamento [mm]		Δd [mm]	Declive
T [°C]	HR [%]	Tempo [h]	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 1	Ponto 2		
20	50	-	4,23	28,28	5,99	40,01	1,08	20,16	19,08	1,26
-20	60	24	4,38	12,91	6,20	18,26	1,67	21,43	19,76	0,43
		48	5,07	16,36	7,17	23,14	1,79	20,62	18,83	0,60
0		24	5,23	16,19	7,39	22,91	1,67	19,51	17,84	0,61
		48	6,05	15,52	8,56	21,95	1,67	20,32	18,65	0,51
40		24	5,62	18,93	7,95	26,78	1,56	21,94	20,38	0,65
		48	6,82	19,78	9,65	27,98	2,16	20,84	18,68	0,69
100	0	24	4,01	17,32	5,68	24,50	1,30	20,04	18,74	0,71
		48	4,14	19,68	5,85	27,84	1,12	19,80	18,68	0,83
		120	5,14	22,99	7,27	32,53	0,97	19,69	18,72	0,95
160		24	6,03	14,88	8,53	21,04	1,79	19,04	17,25	0,51
		48	2,66	14,88	3,76	21,05	0,96	19,23	18,27	0,67
		120	5,18	21,56	7,33	30,50	1,07	19,15	18,08	0,91

Nas Figuras 4.34 e 4.35 são comparados os valores obtidos da tensão inicial e final para a região do patamar para as condições ambientais com humidade relativa de 60 e 0%, respectivamente.

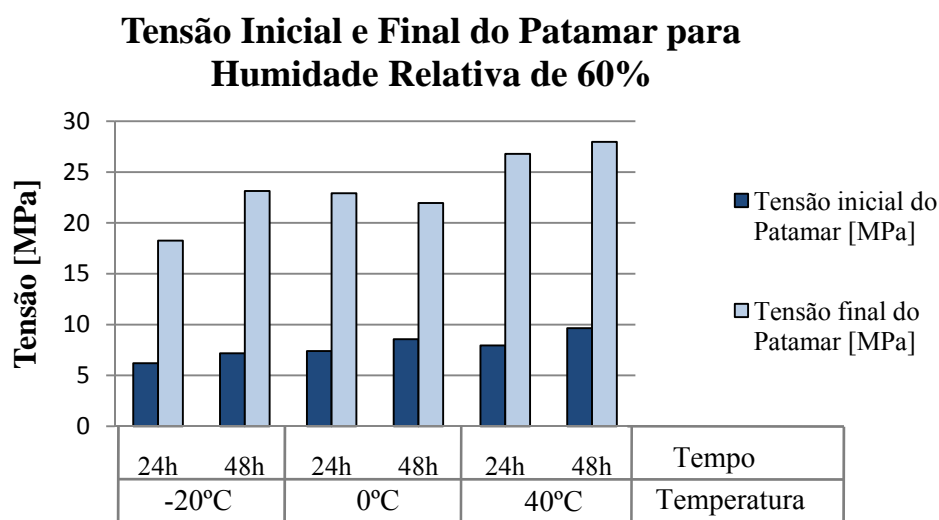


Figura 4.34: Tensão inicial e final do patamar das condições ambientais com humidade relativa de 60%.

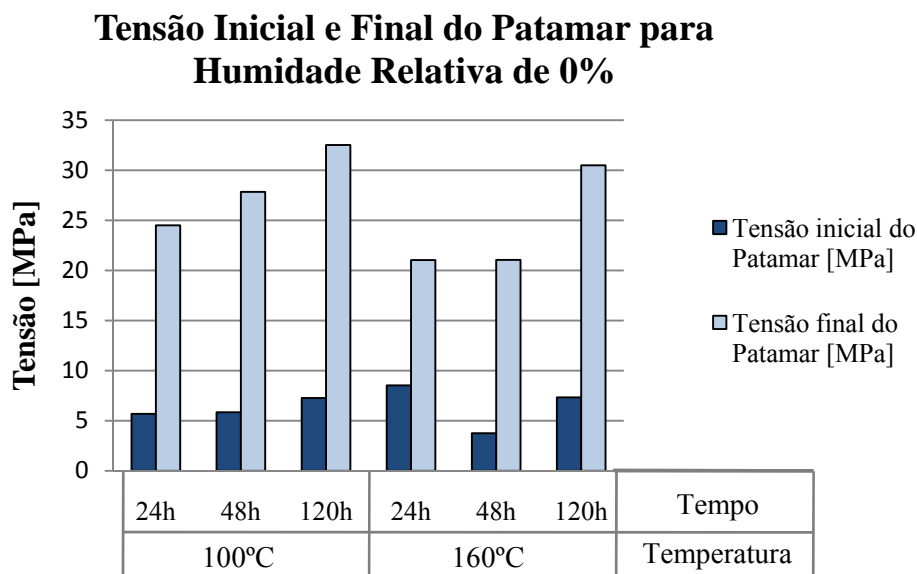


Figura 4.35: Tensão inicial e final do patamar das condições ambientais com humidade relativa de 0%.

Para a percentagem de humidade relativa de 60% e intervalos de temperatura de -20 a 40°C à medida que a temperatura aumenta, a resistência mecânica à compressão aumenta, enquanto para a percentagem de humidade relativa de 0% e intervalo de temperatura de 100 a 160°C, a resistência mecânica à compressão tem tendência a diminuir.

De igual modo, verifica-se que para toda a gama de temperaturas estudada (-20 a 160°C) existe uma tendência dos valores da tensão inicial e final do patamar aumentarem à medida que a temperatura e o tempo de exposição aumentam.

A percentagem de humidade relativa poderá ter uma influência directa no aparecimento dos diferentes compostos químicos no metal de base das paredes celulares das espumas, como se verificou na Secção 4.3. Estes compostos químicos podem aumentar ou diminuir a resistência mecânica, dependendo das suas características. Muitas ligas de Alumínio têm a tendência a formarem intermetálicos que podem endurecer a matriz metálica, aumentando a resistência mecânica. No entanto, certas partículas formadas poderão contribuir para um aumento de concentrações localizadas em certos pontos. Mais ainda, a camada de óxido de Alumínio formada poderá sofrer alterações químicas, originando outros compostos, como por exemplo $\text{Al}(\text{OH})_3$, que está relacionada a quantidade de moléculas de água presente no meio ambiente. Estes mecanismos físico-químicos podem ser acelerados, pelo efeito da temperatura.

4.5. Absorção de Energia

Uma das potenciais aplicações das espumas metálicas é a sua utilização nas estruturas de absorção de energia. Neste trabalho, a capacidade de absorção de energia de espumas de liga AlSi7 foi determinada a partir das curvas obtidas experimentalmente dos ensaios de compressão para as diferentes condições ambientais (Secção 4.4). Assim, as curvas energia-deslocamento foram obtidas através da integração das curvas globais médias força-deslocamento para as diferentes condições ambientais, como se exemplifica na Figura 4.36. Nesta figura apresenta-se a curva média força-deslocamento para a temperatura de 20°C e humidade relativa de 50%, e a respectiva curva de energia acumulada-deslocamento resultante da integração.

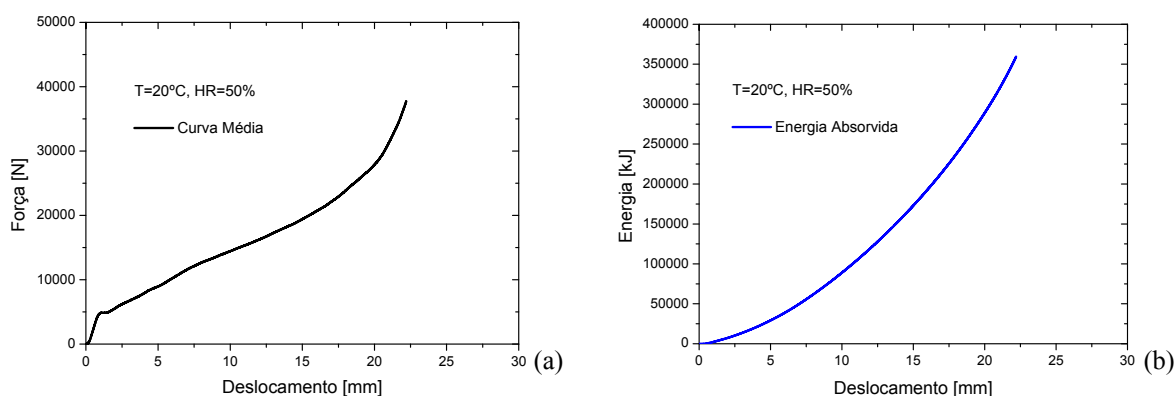


Figura 4.36: Resultados experimentais para espumas de liga AlSi7 submetidas a T=20°C e HR=50%: (a) Curva força-deslocamento e (b) curva energia-deslocamento.

De seguida apresentam-se os resultados mais importantes do estudo da influência da temperatura, do tempo e da humidade relativa na energia absorvida, à semelhança do que foi efectuado na Secção 4.4, sobre a resistência mecânica.

A discussão dos resultados foi baseada na comparação das curvas de energia-deslocamento para as diferentes condições ambientais.

4.5.1. Temperatura

A apresentação e discussão dos resultados obtidos do efeito da temperatura na capacidade de absorção de energia foram efectuadas para dois intervalos de temperatura:

- i) $-20 < T < 40$ [°C], HR=60%;
- ii) $100 < T < 160$ [°C], HR=0%.

Nas Figuras 4.37 e 4.38 são apresentados os resultados do efeito da temperatura para o primeiro intervalo, para tempos de 24 e 48 h, respectivamente.

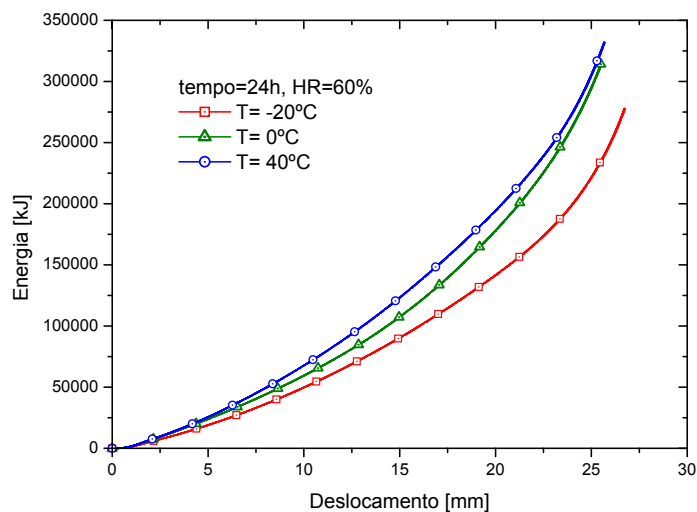


Figura 4.37: Curvas energia–deslocamento para temperaturas de -20, 0 e 40°C, com humidade relativa 60% e tempo de 24 h.

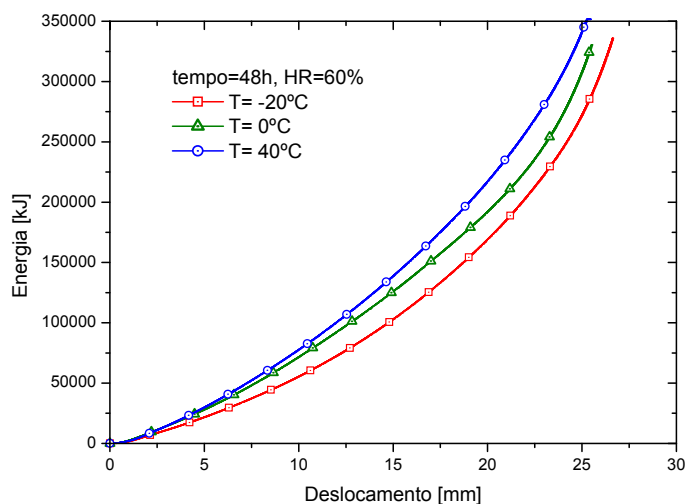


Figura 4.38: Curvas energia–deslocamento para temperaturas de -20, 0 e 40°C, com humidade relativa 60% e tempo de 48 h.

Da análise dos gráficos acima, verifica-se que, independentemente do tempo de exposição a determinada temperatura para o intervalo de temperatura de -20 a 40°C, à medida que a temperatura aumenta, a capacidade de absorção de energia da espuma também aumenta.

Nas figuras seguintes apresentam-se os resultados obtidos para o segundo intervalo de temperaturas (100 a 160°C) para as espumas de ligas AlSi7 estudadas, para a humidade relativa de 0%, para diferentes tempos de exposição de 24 (Figura 4.39), 48 (Figura 4.40) e 120 h (Figura 4.41).

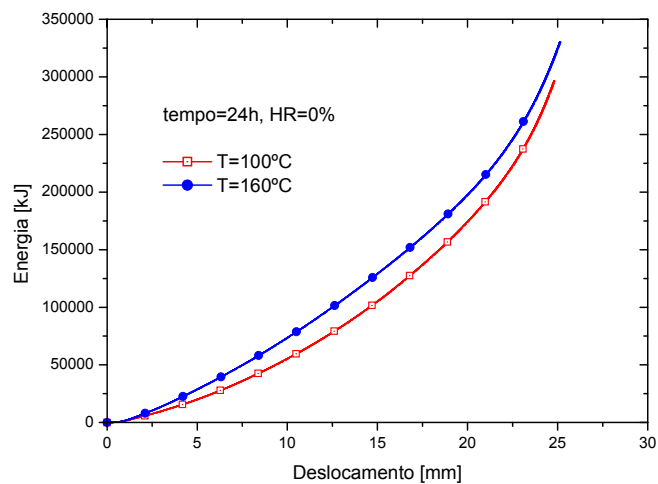


Figura 4.39: Curvas energia–deslocamento para temperaturas de 100 e 160°C, com umidade relativa 0% e tempo de 24 h.

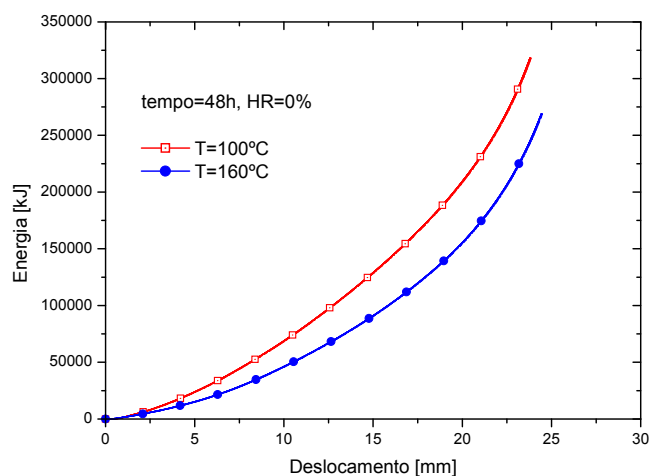


Figura 4.40: Curvas energia–deslocamento para temperaturas de 100 e 160°C, com umidade relativa 0% e tempo de 48 h.

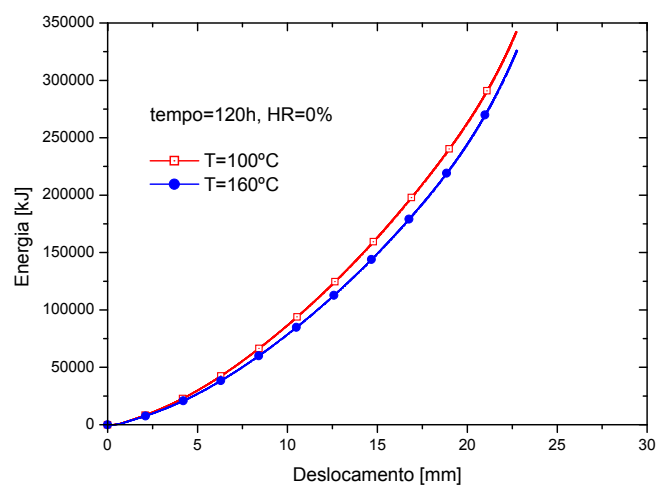


Figura 4.41: Curvas energia–deslocamento para temperaturas de 100 e 160°C, com umidade relativa 0% e tempo de 120 h.

Na análise dos gráficos anteriores, observa-se que para os tempos de exposição 48 e 120 h, as espumas tem a tendência para a diminuição da sua capacidade de absorção de energia, com o aumento da temperatura, para a humidade relativa de 0%. Esta tendência é aparentemente contrariada para o caso de tempos de exposição de 24 h. No entanto, como foi referido na Secção 4.4, a curva média força-deslocamento apresenta elevados desvios padrões, provavelmente associados à anisotropia do material.

4.5.2. Tempo

O estudo do efeito do tempo na capacidade de absorção de energia para as diferentes condições ambientais é apresentado nas Figuras 4.42 a 4.46, para um intervalo de temperaturas de -20 a 160°C.

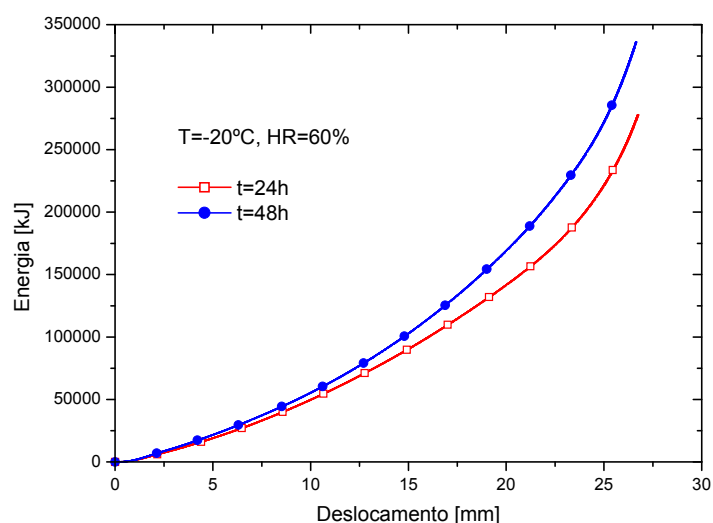


Figura 4.42: Curvas energia–deslocamento para diferentes tempos de exposição (24 e 48 h), com temperatura de -20°C e humidade relativa de 60%.

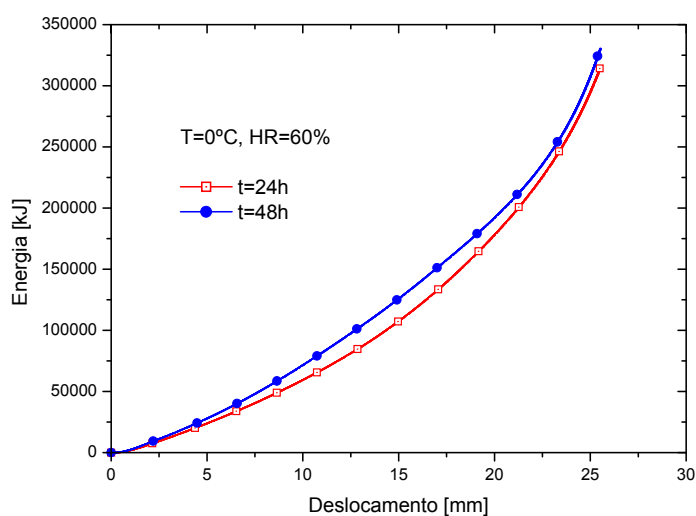


Figura 4.43: Curvas energia–deslocamento para diferentes tempos de exposição (24 e 48 h), com temperatura de 0°C e humidade relativa de 60%.

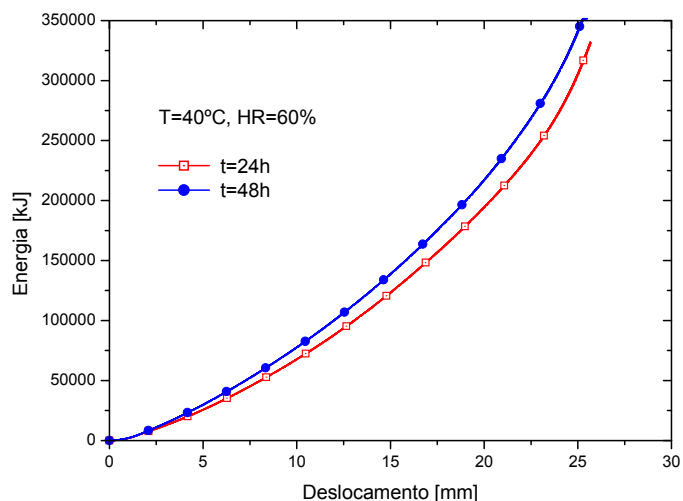


Figura 4.44: Curvas energia–deslocamento para diferentes tempos de exposição (24 e 48 h), com temperatura de 40°C e umidade relativa de 60%.

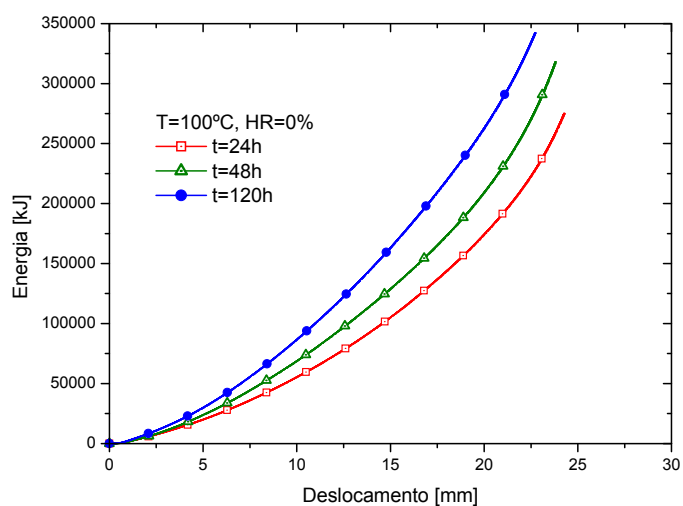


Figura 4.45: Curvas energia–deslocamento para diferentes tempos de exposição (24, 48 e 120 h), com temperatura de 100°C e umidade relativa de 0%.

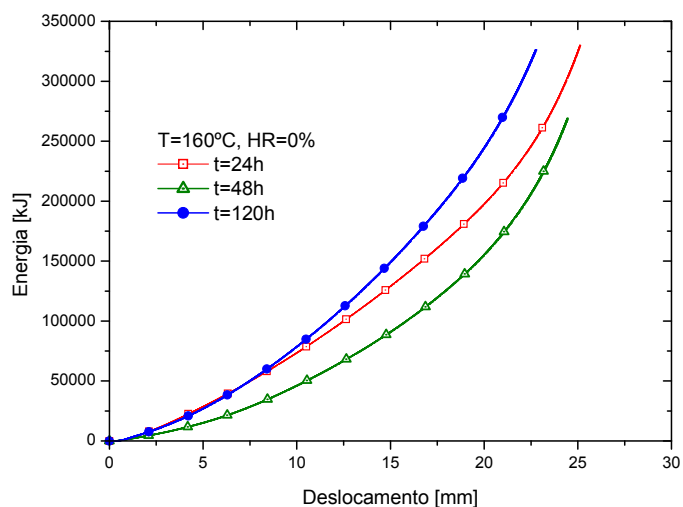


Figura 4.46: Curvas energia–deslocamento para diferentes tempos de exposição (24, 48 e 120 h), com temperatura de 160°C e umidade relativa de 0%.

Nos gráficos acima, observa-se que, independentemente da temperatura, o aumento do tempo de exposição destas espumas de liga AlSi7 tende a aumentar a sua capacidade de absorção de energia. À semelhança das curvas força-deslocamento da Figura 4.33 para a temperatura de 160°C, as respectivas curvas energia-deslocamento apresentam desvios significativos que podem induzir em erro comparando os tempos de 24 e de 48 h (Figura 4.46).

Os resultados evidenciaram que existe um efeito da humidade relativa. Para níveis de humidade relativa de 60% as curvas energia-deslocamento são mais aproximadas para os diferentes tempos (Figuras 4.42 a 4.44). Contrariamente, para os níveis de humidade relativa de 0% as curvas energia-deslocamento tendem a ser mais afastadas (Figuras 4.45 e 4.46). Estes resultados derivam das diferenças apresentadas e discutidas na Secção 4.4, nomeadamente, os diferentes constituintes do material de base da espuma de Alumínio.

O estudo do efeito da temperatura, humidade relativa e tempo de exposição nas propriedades mecânicas das espumas de liga AlSi7 é mais evidenciado analisando as curvas energia-deslocamento, comparativamente com as curvas força-deslocamento.

4.5.3. Humidade Relativa

O comportamento mecânico das espumas de liga de Alumínio é influenciado pela humidade relativa, como se verificou durante a execução deste trabalho.

Resumidamente, para níveis de humidade relativa de 60% as curvas energia-deslocamento são mais aproximadas para os diferentes tempos. Contrariamente, para os níveis de humidade relativa de 0% as curvas energia-deslocamento tendem a ser mais afastadas. Estes resultados derivam da presença de diferentes compostos químicos no metal de base da espuma de Alumínio (Tabela 4.5).

4.5.4. Casos Estudados

Com o objectivo de estudar o comportamento em deformação das espumas de liga AlSi7, analisaram-se dois casos: (i) Caso 1 – comportamento de material para uma deformação de 50% e (ii) Caso 2 – comportamento de material para uma deformação de 80%. De seguida, apresenta-se resumidamente a metodologia utilizada neste trabalho, para o cálculo da energia absorvida.

A energia absorvida por unidade de volume pode ser dada por [4]:

$$E_V = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (18)$$

em que E_V é a energia absorvida por unidade de volume, σ é a tensão de compressão e ϵ corresponde à deformação do material.

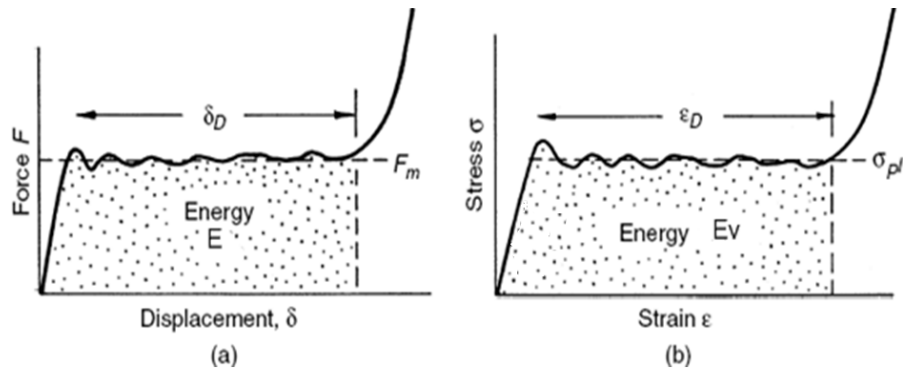


Figura 4.47: Representação esquemática: (a) da curva força–deslocamento e (b) da curva tensão–deformação para um absorvedor de energia. A área abaixo da curva corresponde à energia absorvida. Legenda: E - energia absorvida, E_v - energia por unidade de volume, F- força, δ - deslocamento, σ - tensão, ϵ - deformação [20].

Desta forma, a energia pode ser calculada directamente a partir da curva força–deslocamento, através da integração da área da curva até ao deslocamento requerido (Figura 4.47a), a qual pode ser representada pela seguinte equação [4]:

$$E = \int_0^{\delta} F(\delta) d\delta \quad (19)$$

em que E é a energia absorvida, F é a força e δ é o deslocamento.

Por sua vez, a energia absorvida por unidade de volume pode também ser determinada a partir da curva tensão–deformação (Figura 4.47b).

A energia absorvida dada pela área abaixo das curvas força–deslocamento para as várias condições ambientais, foi determinada para os dois casos estudados.

Assim, o cálculo da energia absorvida por unidade volume é o quociente entre a energia calculada anteriormente e o volume da amostra, desprezando a variação de volume durante o ensaio mecânico, que pode ser dada por [4]

$$E_V = \frac{1}{Vol} \int F(\delta) d\delta \quad (20)$$

Os resultados obtidos referentes à energia de absorção para 50 e 80% de deformação para as diferentes condições ambientais são apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18: Energia por unidade de volume para as diferentes condições ambientais, para deformações de 50 e 80%.

Condições ambientais			Energia absorvida por unidade de volume [MJ/m³]	
T [°C]	HR [%]	t [h]	Deformação de 50%	Deformação de 80%
20	50	-	6,74	16,28
-20	60	24	4,28	9,44
		48	4,86	11,60
0		24	5,10	12,46
		48	5,95	12,94
40		24	5,83	12,98
		48	6,55	14,55
100	0	24	4,96	14,00
		48	6,09	15,00
		120	7,75	17,08
160		24	6,12	13,62
		48	4,32	11,96
		120	7,08	16,44

Uma das conclusões imediatas é que estes materiais apresentam valores de energia de absorção por unidade de volume mais elevados do que materiais usados geralmente como absorvedores de energia, por exemplo, espumas poliméricas, referenciados na literatura [3, 4]. Esta é uma das razões pelas quais as espumas podem ser usadas como estruturas de absorção de energia em veículos, para proporcionar um aumento de segurança activa.

Os resultados mostram também que a capacidade de absorção de energia por unidade de volume, para a deformação de 80% é mais elevada que para a deformação de 50%, atingindo valores superiores ao dobro.

Os efeitos dos parâmetros das condições ambientais (temperatura, tempo, humidade relativa) são também evidenciados neste estudo. O aumento do tempo de exposição, independentemente da temperatura e da humidade relativa, tem tendência a aumentar o valor da energia absorvida por unidade de volume para ambos os níveis de deformação (50 e 80%). Os valores de energia por unidade de volume para ambientes com humidade relativa de 0% e temperaturas de 100 a 160°C têm uma tendência clara para serem superiores aos ambientes com humidade relativa de 60% e temperaturas de -20 a 40°C. Por último, a energia por unidade de volume aumenta com o aumento da temperatura para gamas de temperatura de -20 a 40°C, tendo uma tendência inversa para a gama de temperatura de 100 a 160°C.

Deste estudo, conclui-se que estes materiais apresentam melhor comportamento em deformação à medida que o tempo de exposição aumenta a uma dada temperatura, o que é evidenciado para as temperaturas de 100 e de 160°C e tempo de exposição de 120 h, a energia absorvida tem valores

superiores (vd. Figuras 4.48 e 4.49). Tal pode ser devido ao favorecimento da reacção de formação de compostos químicos no interior da matriz de liga AlSi7.

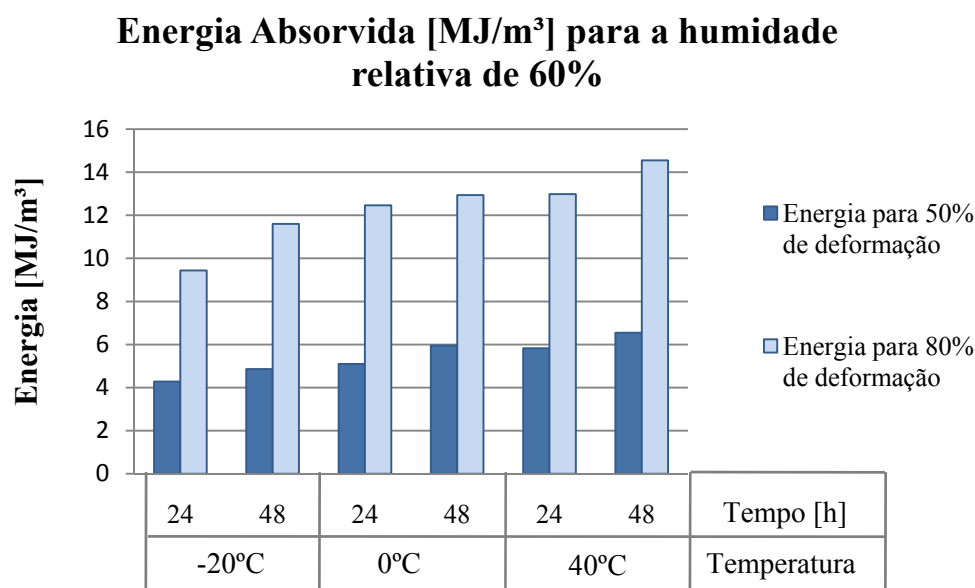


Figura 4.48: Energia absorvida por unidade de volume para as condições ambientais com humidade relativa de 60%.

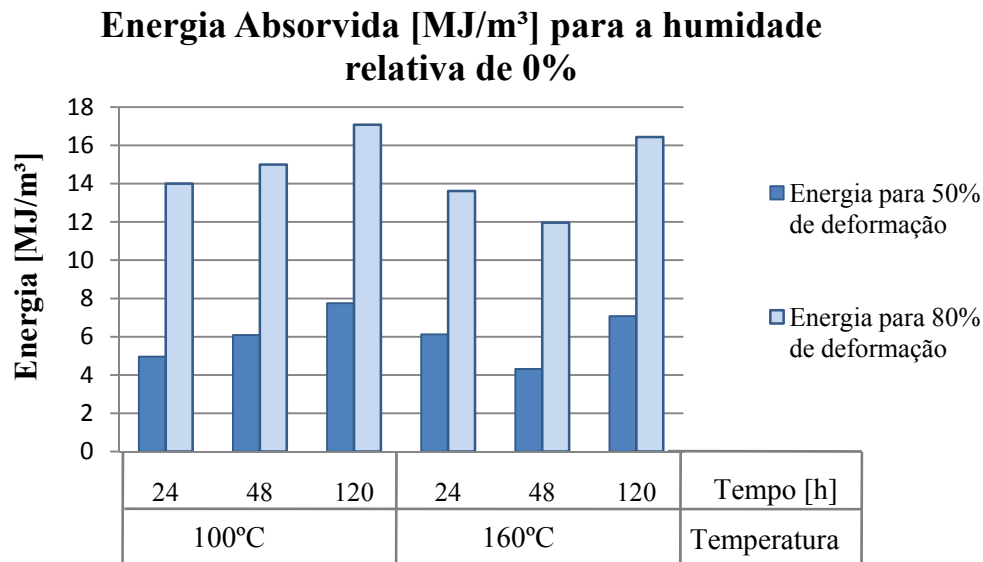


Figura 4.49: Energia absorvida por unidade de volume para as condições ambientais com humidade relativa de 0%.

Capítulo 5 - Conclusões

5.1. Estrutura Celular

Os resultados experimentais da caracterização da estrutura celular permitiram concluir que as espumas de Alumínio e suas ligas, obtidas por pulverotecnologia apresentam as seguintes características principais:

- Uma estrutura celular com uma distribuição alargada de tamanhos de poros e de geometrias irregulares.
- Uma elevada percentagem de poros celulares com diâmetro inferior a 2 mm, seguido de poros no intervalo de 2 - 4 mm de diâmetro.
- A presença de diferentes tipos de geometria dos poros, incluindo a geometria poliédrica e esférica.
- Os poros esféricos encontram-se maioritariamente localizados na base e nas zonas laterais das amostras, localizando-se por vezes nas paredes celulares de elevada espessura.
- Os poros poliédricos são observados principalmente no topo das amostras, apresentando paredes celulares finas.
- A presença de uma película externa densa à volta de cada amostra de espuma. A espessura da película densa externa não é constante e depende da sua localização na amostra, sendo mais espessa na base destas amostras.
- A presença de fendas nas paredes dos poros celulares.
- Algumas intersecções contêm poros de pequena dimensão e o número de lamelas não é constante, observando-se intersecções de três e de quatro paredes.

A anisotropia observada nestas espumas é devido ao próprio processo de fabrico destes materiais que consiste em submeter um material precursor a temperaturas superiores à temperatura de fusão do metal de base. O material precursor é obtido por compactação a quente de uma mistura de pós de Alumínio, Silício e dihidreto de Titânio (agente expensor). A formação da espuma deve-se a dois mecanismos que ocorrem em simultâneo, a fusão do metal e a decomposição térmica do dihidreto de Titânio dando origem à formação de Hidrogénio. Consequentemente, a anisotropia é devida à não-uniformidade da distribuição das partículas de dihidreto de Titânio no interior da matriz metálica.

Os outros aspectos estruturais estão relacionados como o próprio crescimento da espuma. No crescimento da espuma, inicialmente as bolhas crescem tornando-se esféricas e a quantidade de metal inicial na interface entre as bolhas é elevada. Após algum tempo ocorre a drenagem do metal fundido das interfaces entre as bolhas. Assim, as células esféricas possuem filmes de líquidos espessos e são frequentemente observadas no início do estágio de crescimento da formação da espuma. Conforme o líquido drena, a espessura destes filmes diminui, diminuindo a distância entre as bolhas de gás, as quais adquirem a geometria poliédrica. As bolhas de forma poliédrica estão separadas por filmes finos de líquido (faces), e por sua vez as faces dos poliedros são superfícies curvas, cuja intersecção forma as junções de Plateau [2].

A existência de poros de grandes dimensões e de formas irregulares deveu-se a fenômenos de coalescência que consiste no crescimento de algumas bolhas pelo desaparecimento de outras no processo de expansão da espuma. A coalescência ocorre quando a lamela entre duas bolhas vizinhas começa a ser instável e rompe. A lamela comum desaparece e ocorre então a junção de duas bolhas. Normalmente as bolhas de pequena dimensão com uma elevada pressão podem desaparecer facilmente, dando o gás a uma bolha vizinha de maiores dimensões [2].

As diferentes espessuras da película densa externa identificadas nas espumas devem-se à drenagem que pode ocorrer na formação da espuma. A drenagem é o escoamento do metal fundido através das paredes celulares pelo efeito da gravidade.

A presença de fendas em algumas paredes celulares das espumas de Alumínio estudadas, pode dever-se ao arrefecimento brusco das amostras após a sua formação para temperaturas abaixo da temperatura de fusão, de forma a solidificar as mesmas [2].

5.2. Influência das condições ambientais

5.2.1. Metal de Base das Paredes Celulares das Espumas

As condições ambientais influenciam a composição química do metal de base das paredes celulares da espuma de liga AlSi7. Por exemplo, para a temperatura de -20°C , a liga AlSi7 forma hidróxido de Alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) resultante do envelhecimento da camada de alumina (Al_2O_3), ou forma intermetálicos para temperatura de 160°C . A cinética da reacção de formação destes compostos químicos depende da temperatura, do tempo, da humidade relativa e do tipo e quantidade de elementos químicos presentes no metal de base das paredes celulares da espuma.

5.2.2. Densidade

A densidade das espumas de Alumínio de liga AlSi7, de cerca de $0,55 \text{ g/cm}^3$, não apresenta variações significativas quando submetidas às diferentes condições ambientais. Tal facto pode ser devido a duas razões. A primeira razão é a protecção conferida pela película densa externa existente nestas amostras que evita a transferência de moléculas de água entre o meio ambiente e o interior da amostra. A segunda razão está relacionada com o próprio material de base, o Alumínio, que é um material que sofre corrosão quando exposto ao ar, devido ao óxido que se forma espontaneamente na superfície [26]. A camada fina de óxido formada oferece uma baixa resistência para a difusão de oxigénio, não alterando significativamente a composição do material significativamente e, por conseguinte, não afectando a densidade do material.

5.2.3. Resistência Mecânica

Temperatura

As espumas de liga AlSi7, apresentam dois tipos de comportamento mecânico quando submetidas a diferentes condições ambientais na gama de temperaturas estudada. Para temperaturas entre -20 e 40°C e níveis de humidade relativa de 60%, a resistência mecânica aumenta com a temperatura. Contrariamente, para temperaturas entre 100 e 160°C existe tendência para a resistência mecânica diminuir com o aumento de temperatura.

As diferenças no comportamento mecânico para estas gamas de temperatura podem dever-se aos seguintes factores:

- (v) A formação de diferentes compostos químicos no metal de base constituinte das paredes celulares das espumas consoante a condição ambiental a que são submetidas. Por exemplo, para as temperaturas de -20, 20 e 160°C foi identificada a presença de Al(OH)_3 , Ti_3AlC e TiAl , respectivamente. A presença destes compostos pode contribuir para a diminuição ou acréscimo da resistência mecânica.
- (vi) As velocidades do ciclo térmico inicial para atingir a temperatura requerida em cada teste ambiental para as diferentes gamas de temperatura estudadas (100 a 160°C e -20 a 40°C) foram diferentes (4,5 e 1°C/min). Esta diferença pode contribuir para alterações na estrutura celular da espuma.
- (vii) A presença de Hidrogénio aprisionado no interior dos poros celulares da espuma pode originar diferentes pressões internas e, consequentemente, alterar os valores da resistência mecânica. O aumento da pressão interna nos poros celulares pode mesmo contribuir para o colapso das células [3].

Tempo

A resistência mecânica das espumas de liga AlSi7 aumenta com o aumento do tempo de exposição, para uma determinada temperatura. Esta conclusão pode dever-se ao favorecimento da cinética da reacção de formação dos compostos químicos no metal de base das paredes celulares da espuma como, por exemplo, precipitados, intermetálicos, *etc.*

Humidade Relativa

O efeito da humidade relativa na resistência mecânica das espumas de liga de Alumínio é diferente consoante o ambiente: (i) $\text{HR}=60\%$, $T \in [-20^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}]$; (ii) $\text{HR}=0\%$, $T \in [100^\circ\text{C} - 160^\circ\text{C}]$. À medida que a temperatura aumenta a resistência aumenta no caso (i), diminuindo para o caso (ii).

A cinética da reacção dos diferentes compostos químicos identificados para as diferentes condições ambientais depende dos elementos químicos presentes, da temperatura, do tempo e da humidade relativa. Desta forma, a humidade relativa a que a espuma é submetida pode ter influência directa.

5.2.4. Absorção de Energia

Uma das conclusões imediatas deste trabalho é que as espumas de liga AlSi7 estudadas são potenciais materiais que podem ser usados para estruturas ultra-leves e de absorção de energia comparando com outros vulgarmente usados [2]. Estas espumas, para a deformação de 50%, apresentam valores de energia absorvida por unidade de volume entre 4,28 e 6,74 MJ/m³ e entre 4,32 e 7,75 MJ/m³ para as gamas de temperaturas de -20 a 40°C e de 100 a 160°C, respectivamente. Estes valores são superiores ao dobro para níveis de deformação de 80%, sendo, respectivamente 9,44 a 16,28 MJ/m³ e 11,96 a 17,08 MJ/m³.

As conclusões do estudo da influência dos diferentes parâmetros das condições ambientais (temperatura, tempo e humidade relativa) na absorção de energia das espumas de liga AlSi7 foram similares às mencionadas para a resistência mecânica.

O aumento da temperatura favorece a capacidade de absorção de energia das espumas para o intervalo de temperatura de -20 a 40°C. Contrariamente, para o intervalo de temperatura de 100 a 160°C, a capacidade de absorção de energia diminui.

O aumento do tempo de exposição destas espumas, independentemente da temperatura, tende a aumentar a sua capacidade de absorção de energia.

O efeito da percentagem de humidade relativa nas propriedades mecânicas das espumas não foi totalmente clarificado devido a dificuldades experimentais. No entanto, verificou-se que para níveis de humidade relativa de 60% as curvas de energia–deslocamento são mais aproximadas para os diferentes tempos de exposição. Contrariamente, para os níveis de humidade relativa de 0% as curvas de energia–deslocamento tendem a ser mais afastadas.

Capítulo 6 - Sugestões de trabalho futuro

Das principais conclusões e dificuldades deste trabalho de investigação, são sugeridos alguns tópicos de investigação, para melhorar o conhecimento do efeito dos diferentes parâmetros das condições ambientais no comportamento mecânico das espumas de Alumínio:

1. Estudo da influência dos parâmetros do ciclo térmico na microestrutura e na composição química do metal de base das paredes celulares da espuma, nomeadamente a velocidade de aquecimento e arrefecimento.
2. Avaliação do efeito das condições ambientais noutras propriedades mecânicas como, por exemplo, a dureza, o comportamento à fadiga, condutividade eléctrica, *etc.*
3. Estudo da influência de outros meios ambientes (salinos e vácuo) nas espumas de Alumínio.
4. Estudo da influência da presença da película externa densa nas propriedades mecânicas destas espumas para diferentes condições ambientais.
5. Estudo da influência das condições ambientais em espumas de Alumínio obtidas por outros processos de fabrico e para diferentes composições químicas.

Bibliografia

1. Duarte, I.M.A., *Materiais Celulares - Espumas Metálicas*. 2007, Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Aveiro: Aveiro.
2. Duarte, I.M.A., *Espumas metálicas processo de fabrico, caracterização e simulação numérica*. 2005, Porto: [s.n.]. XXIX, 200 f.
3. Gibson, L.J. and M.F. Ashby, *Cellular solids: structure and properties*. 2nd ed. Cambridge solid state science series. 1997, Cambridge ; New York: Cambridge University Press. xviii, 510 p.
4. Degischer, H.-P. and B. Kriszt, *Handbook of cellular metals : production, processing, applications*. 2002, Weinheim: Wiley-VCH. xxiv, 373 p.
5. Gibson, L.J., *Mechanical Behavior Of metallic Foams*. Annual Reviews in Materials Science, 2000. **30**(1): p. 191-227.
6. Banhart, J., *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams*. Progress in Materials Science, 2001. **46**(6): p. 559-632.
7. Stöbener, K., et al., *Composites Based on Metallic Foams: Phenomenology; Production; Properties and Principles*. Proc (Nov. 2003), International Conference "Advanced Metallic Materials, 2003.
8. Duarte, I.M.A. *Produção de Componentes Integrados de Espumas de Ligas de Alumínio com Insertos Metálicos*. in *6º Congresso Nacional em Mecânica Experimental*. 2005. Ponta Delgada.
9. Duarte, I.M.A. *Desenvolvimento de um Processo Tecnológico de Produção de Espumas Metálicas em Contínuo*. in *6º Congresso Nacional em Mecânica Experimental*. 2005. Ponta Delgada.
10. Duarte, I. and J. Banhart, *A study of aluminium foam formation - kinetics and microstructure*. Acta Materialia, 2000. **48**(9): p. 2349-2362.

11. Baumgärtner, F., I. Duarte, and J. Banhart, *Industrialization of powder compact foaming process*. Advanced engineering materials(Print), 2000. **2**(4): p. 168-174.
12. IFAM. *Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials Research Web site*. 2008 [cited 2008 10 de Março]; Available from: <http://www.ifam.fraunhofer.de/index.php?seite=&lang=en>.
13. Singer, R.F., *Cellular metals and polymers : CMaP : proceedings of the Symposium on Cellular Metals and Polymers : sponsored by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) : held October 12-14, 2004, in Fürth, Germany*. 2005, Uetikon-Zuerich, Switzerland Enfield, N.H.: Trans Tech Publications Ltd. xii, 286 p.
14. Duarte, I.M.A. *Aplicações Funcionais das Espumas Metálicas*. in *6º Congresso Nacional em Mecânica Experimental*. 2005. Ponta Delgada.
15. Markaki, A.E., P. Colombo, and T.W. Clyne, *Highly Porous Cellular Metals and Ceramics: Thermo-Mechanical Properties*.
16. Baumeister, J., J. Banhart, and M. Weber, *Aluminium foams for transport industry*. Materials & Design, 1997. **18**(4-6): p. 217-220.
17. Rausch, G., *FOAMINAL - Properties Overview and Design Guideline*, 1.4, Editor. 2001, Institute Manufacturing and Advanced Materials.: Bremen. p. 18.
18. Duarte, I.M.A. *Aplicações de Espumas de Ligas de Alumínio no Sector de Transportes*. in *6º Congresso Nacional em Mecânica Experimental*. 2005. Ponta Delgada.
19. Incropera, F.P. and D.P. DeWitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*. 5th ed. 2002, New York: J. Wiley. xix, 981 p.
20. Ashby, M.F. and Society of Automotive Engineers., *Metal foams : a design guide*. 2000, Woburn, MA: Butterworth-Heinemann. xiv, 251 p.
21. WebTeam, E. *European Environment Agency (EEA)*. 2008 [cited 2008 14 de Março]; Available from: <http://www.eea.europa.eu/>.
22. Günter, S., A. Olaf, and G. Hartmut, *CELLMET NEWS*, in *IFAM*. 2005: Winterbergstr , Dresden, Germany.
23. Duarte, I.M.A. *Aplicações Estruturais das Espumas Metálicas*. in *6º Congresso Nacional em Mecânica Experimental*. 2005. Ponta Delgada.

24. Chen, W.F. and E.M. Lui, *Handbook of Structural Engineering*. 2005: CRC Press.
25. De Castro, J.A., A.F. Ferreira, and A.J. da Silva, *Simulação da Solidificação de uma Liga de Alumínio-Silício em um Processo de Cinto Único*. ENGEVISTA, 2004. 6: p. 35-46.
26. Vargel, C., *Corrosion of aluminium*. 1st ed. 2004, Amsterdam ; Boston: Elsevier. xxxii, 626 p.
27. Avner, S.H., *Introduction to physical metallurgy*. 2d ed. 1974, New York,: McGraw-Hill. viii, 696 p.
28. Kissell, J.R. and R.L. Ferry, *Aluminum structures : a guide to their specifications and design*. 2nd ed. 2002, New York: J. Wiley. xi, 532 p.
29. Davyson, S. *Aluminium Properties*. 2004 [cited 2008 25 Março]; The content was originally prepared as part of an AS physics research project but has since to refurbished by Sam Davyson to its current form.]. Available from:
<http://sam.davyson.com/as/physics/aluminium/site/properties.html>.
30. Furio, P.D., *Medidas para Caracterização e Análise de Materiais*. DSIF - Departamento de Semicondutores Instrumentos e Fotônica. 2000.
31. Vaz, R.M.A., *Crescimento e Caracterização de Filmes de Diamante em Substratos de Aço*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2008, Universidade de Aveiro: Aveiro. p. 83.
32. Duarte, I.M.A., *Técnicas Experimentais de Investigação em Materiais II - Microscopia Electrónica de Varrimento*, in *CEMUP - Centro de Materiais da Universidade do Porto*. 1996, Universidade do Porto: Porto.
33. Santin, R. and C. Cusaitis, *Microscopia de raios X com cristais perfeitos assimétricos*, in *Programa de Pós-Graduação em Física, do sector de Ciências Exactas*. 2007, Universidade Federal do Paraná: Curitiba.
34. Technology, A. *INFOMET.NET*. 2003 [cited 2008 6 de Maio]; Available from:
<http://www.infomet.net/>.
35. Chang, R., *Chemistry*. 5th ed. 1994, New York: McGraw-Hill. 1 v. (various pagings).
36. Ruan, D., et al., *Triaxial compression of aluminium foams*. *Composites Science and Technology*, 2007. 67(6): p. 1218-1234.

37. Peroni, L., M. Avalle, and M. Peroni, *The mechanical behaviour of aluminium foam structures in different loading conditions*. International Journal of Impact Engineering, 2008. **35**(7): p. 644-658.
38. Campana, F. and D. Pilone, *Effect of wall microstructure and morphometric parameters on the crush behaviour of Al alloy foams*. Materials Science & Engineering A, 2008. **479**(1-2): p. 58-64.
39. Duarte, I.M.A., et al., *Compressive deformation behaviour of closed-cell aluminium foams*. 2007.
40. Banhart, J. *metalf foam.net*. 2008 5th March [cited 2008 10 de Fevereiro]; Available from: <http://www.metalf foam.net/>.
41. NWS, I.S.T. *National Oceanic and Atmospheric Administration's - National Weather Service*. 2002 [cited 2008 30 de Março]; Available from: <http://www.nws.noaa.gov/>.
42. Office, M. *Met Office*. 1998 [cited 2008 15 de Março]; Available from: <http://www.metoffice.gov.uk/>.